

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté d'éducation

Doctorat en éducation

MODÈLES ET MODÉLISATION EN PHYSIQUE DANS LES PRATIQUES  
D'ENSEIGNEMENT D'ENSEIGNANTS QUÉBÉCOIS DU SECONDAIRE : LE CAS DE LA  
CINÉMATIQUE

Par Patrick Roy

Thèse présentée à la Faculté d'éducation  
en vue de l'obtention du grade de

Philosophiæ Doctor (Ph.D.)

Septembre 2018



# UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté d'éducation

Doctorat en éducation

## MODÈLES ET MODÉLISATION EN PHYSIQUE DANS LES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT D'ENSEIGNANTS QUÉBÉCOIS DU SECONDAIRE : LE CAS DE LA CINÉMATIQUE

La thèse a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

### PRÉSIDENTE DU JURY

La professeure **Claudia Gagnon**, Responsable du programme de doctorat en éducation,  
Faculté d'éducation, Université de Sherbrooke

### MEMBRES DU JURY

#### Directeur de recherche

Le professeur **Abdelkrim Hasni**, Département d'enseignement au préscolaire et au  
primaire, Faculté d'éducation, Université de Sherbrooke

#### Codirecteur de recherche

Le professeur **Dominique Lefebvre**, Département de génie civil, Faculté de génie,  
Université de Sherbrooke

#### Examinateur externe

Le professeur **Jean-Marie Boilevin**, ESPE de Bretagne, Université de Bretagne  
Occidentale, France

#### Examinatrice externe

La professeure **Audrey Groleau**, Département des sciences de l'éducation, Université  
du Québec à Trois-Rivières

#### Examinatrice interne

La professeure **Otilia Popescu Holgado**, Département de pédagogie, Faculté  
d'éducation, Université de Sherbrooke

Thèse acceptée le 20 septembre 2018.





## SOMMAIRE

L'histoire des sciences témoigne de la place centrale des modèles dans le développement de nombreuses théories scientifiques. S'ils permettent la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes, les modèles sont nombreux et diversifiés en raison des multiples phénomènes qu'ils peuvent expliquer et de la diversité des registres de représentation sémiotique pouvant être utilisés pour les représenter. Quant à la modélisation qui exprime les processus de construction des modèles, elle constitue le fonctionnement essentiel des sciences, plus particulièrement de la physique. Ces objets de savoir, considérés par plusieurs didacticiens comme étant des composantes essentielles à l'apprentissage des disciplines scientifiques, s'inscrivent dans les plans d'étude de sciences de l'école obligatoire de nombreux systèmes éducatifs à travers le monde comme c'est le cas au Québec dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire.

Si, au cours des trois dernières décennies, les modèles et la modélisation ont fait l'objet d'une exploration importante dans les recherches en didactique des sciences sous l'angle des conceptions des élèves, des pratiques d'enseignement déclarées ou encore sur celui des pratiques d'enseignement observées dans des recherches collaboratives, ces objets d'étude ont été peu explorés sous l'angle des pratiques d'enseignement ordinaires<sup>1</sup>, plus particulièrement dans le domaine de la cinématique, alors que ce domaine est fondamental dans l'apprentissage de la physique mécanique et qu'il pose de nombreux défis à l'école obligatoire. Cette recherche doctorale de nature exploratoire et descriptive s'inscrit dans la foulée des travaux réalisés dans le monde francophone qui considèrent les pratiques d'enseignement du point de vue des actions conjointes de l'enseignant et des élèves en accordant une place centrale aux savoirs disciplinaires dans l'organisation de ces pratiques, et dans la continuité des travaux permettant d'établir de fortes relations entre les spécificités des pratiques d'enseignement et les acquisitions conceptuelles chez les élèves. Elle consiste en une étude de cas multiples qui porte sur les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation de deux enseignants québécois de physique de 5<sup>e</sup>

---

<sup>1</sup> La pratique d'enseignement ordinaire se réfère à une pratique qui n'est pas influencée par des chercheurs, comme c'est le cas dans une recherche collaborative.

secondaire en vue de les relier aux apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique.

Le cadre conceptuel est structuré autour de trois concepts-clés : 1) le concept de modèle en sciences et dans l'éducation scientifique ; 2) le concept de modélisation que nous appréhendons sous deux angles : celui d'un processus mettant en relation le monde concret et le monde conceptuel, et celui d'une démarche d'investigation scientifique particulière pouvant prendre deux configurations emblématiques : la démarche de modélisation inductiviste-applicationniste et la démarche de modélisation constructiviste ; 3) le concept de pratique d'enseignement que nous considérons comme une activité finalisée, à la fois universelle et singulière, multimodale, multidimensionnelle et que nous appréhendons comme une action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage. Ce cadre définit par ailleurs les spécificités de la modélisation dans le contexte de la cinématique du point matériel en convoquant les concepts fondamentaux nécessaires à la modélisation de divers phénomènes physique. Mis en relation, ces concepts-clés permettent d'opérationnaliser un cadre d'analyse intégrant des fondements théoriques et opérationnels sur les pratiques d'enseignement en usage en Europe francophone et en Amérique du Nord.

Quatre dimensions d'analyse des pratiques sont retenues, parmi lesquelles une s'avère centrale : la dimension opérationnelle. Et de ces quatre dimensions découlent cinq questions spécifiques de recherche :

1. Pour la dimension conceptuelle : *Quelles significations les enseignants attribuent-ils aux modèles et à la démarche de modélisation en physique ?*
2. Pour la dimension fonctionnelle : *Quelles sont les finalités éducatives associées à l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique ?*
3. Pour la dimension opérationnelle : *Comment s'opérationnalise l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation dans les pratiques d'enseignement ordinaires des enseignants ? Quel potentiel ces pratiques offrent-elles pour la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique, plus particulièrement en cinématique ?*
4. Pour la dimension organisationnelle : *Quels sont les défis, les difficultés, ainsi que les facteurs facilitant ou entravant l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique ?*

Les analyses sont menées dans une double visée : 1) caractériser et comparer la singularité des pratiques d'enseignement de deux enseignants (appelés après l'enseignante 1 et l'enseignant 2) de manière à dégager leur potentialité sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique (mouvements d'objets matériels en chute libre, sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.) ; 2) identifier les caractéristiques de ces pratiques favorisant les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique.

Sous l'angle de la dimension opérationnelle, les résultats mettent en évidence des configurations relativement symétriques pour l'ensemble des indicateurs d'ordre macroscopique, mésoscopique et microscopique retenus, lesquels touchent des aspects liés à la chronogénèse, la mésogénèse et la topogénèse du savoir. Ils montrent que l'enseignement de la physique chez l'enseignante 1 s'inscrit dans une perspective inductiviste-applicationniste, mais comporte toutefois plusieurs activités de modélisation (démonstrations expérimentales, simulations informatiques, etc.) permettant aux élèves de se doter des outils nécessaires à une compréhension concrète des phénomènes physiques. Du côté de l'enseignant 2, l'enseignement de la physique prend plutôt la configuration emblématique d'une démarche de modélisation constructiviste permettant aux élèves de prendre en charge l'élaboration des modèles, et de s'appuyer subséquentement sur ceux-ci pour formuler des énoncés scientifiques sur des phénomènes physiques. En donnant l'opportunité aux élèves de concevoir, comparer, évaluer, tester et réviser des modèles et de réfléchir sur leur nature, l'enseignant 2 développe chez eux des connaissances méthodologiques et épistémologiques sur la modélisation, ces dernières relevant de la métacognition critique.

Il apparaît également que les démarches de modélisation inductiviste-applicationniste et constructiviste n'offrent pas le même potentiel sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique. Plus précisément, le recours à une démarche de modélisation constructiviste favoriserait les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Une meilleure compréhension des savoirs conceptuels de cinématique chez les élèves s'expliquerait par un enseignement de la physique dont : 1) la continuité du savoir est élevée ; 2) les thèmes disciplinaires sont traités en laboratoire

plutôt que dans des moments de théorisation ou d'exercisation ; 3) le savoir émerge de situations expérimentales plutôt que de manière décontextualisée, de ressources didactiques, de situations fictives ou de démonstrations expérimentales ; 4) le savoir est construit par les élèves ou conjointement par l'enseignant et les élèves plutôt que transmis uniquement par l'enseignant. À contrario, le recours à une démarche de modélisation inductiviste-applicationniste engendrerait des blocages conceptuels fréquents et freinerait l'acquisition des concepts et modèles du mouvement.

Si la dimension opérationnelle de la pratique est au cœur de notre cadre d'analyse, les autres dimensions d'analyse (conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle) apportent un éclairage complémentaire sur les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation de ces deux enseignants. Elles laissent présager que le principal objectif de l'enseignement de la physique devrait être d'enseigner le jeu de modélisation et confirment l'intérêt pour les enseignants d'engager leurs élèves dans des démarches de modélisation constructivistes se caractérisant par les quatre attributs suivants : 1) leur paradigme de référence est le rationalisme scientifique où le savoir est considéré comme un artéfact, une construction théorique pouvant être débattue ; 2) les finalités de l'expérimentation sont la construction d'un modèle et la mise à l'épreuve de ses limites, l'abstraction et la construction des connaissances ; 3) le statut conféré au modèle est celui d'un objet intermédiaire entre le concret et la théorie, un fait à construire au sein d'une situation expérimentale problématisée et non structurée (protocole à construire) ; 4) les connaissances initiales des élèves sont le point de départ d'un processus de problématisation visant à faire adopter des modèles plus valides de la réalité que ceux dont ils disposent initialement.

Adopter un enseignement des modèles et de la modélisation s'inscrivant dans une perspective constructiviste n'est pas trivial. Cela nécessite que l'enseignant dispose de solides compétences épistémiques, épistémologiques et didactiques sur ces objets d'étude. De notre point de vue, ces compétences devraient être considérées au premier rang dans les dispositifs de formation initiale et continue des enseignants.

**Mots-clés :** modèles, modélisation, pratiques d'enseignement, physique, cinématique, enseignement secondaire.

*À François*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>5</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>18</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>21</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>26</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>27</b>
<b>PREMIER CHAPITRE : LA PROBLÉMATIQUE .....</b>	<b>32</b>
1. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION EN SCIENCES.....	32
2. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION DANS L'ÉDUCATION SCIENTIFIQUE.....	34
3. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION COMME COMPOSANTES FONDAMENTALES DU PROGRAMME QUÉBÉCOIS DE PHYSIQUE DE 5 <sup>E</sup> SECONDAIRE .....	43
4. LES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ORDINAIRES DES MODÈLES ET DE LA MODÉLISATION EN CINÉMATIQUE COMME OBJET D'ÉTUDE .....	47
4.1 L'étude des conceptions et des pratiques d'enseignement déclarées des modèles et de la modélisation.....	48
4.2 L'étude des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans le cadre de recherches collaboratives.....	52
4.3 L'étude des pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation dans le domaine de la cinématique .....	53
<b>DEUXIÈME CHAPITRE : LE CADRE CONCEPTUEL.....</b>	<b>58</b>
1. LE CONCEPT DE MODÈLE .....	59
1.1 Une grande diversité de typologies des modèles.....	59
1.1.1 Des modèles catégorisés selon leur statut ontologique.....	59
1.1.2 Des modèles catégorisés selon leur rapport à la réalité .....	61
1.1.3 Des modèles catégorisés selon les registres de représentation sémiotique.....	62
1.1.4 Des modèles catégorisés selon leurs fonctions.....	63
1.1.5 Des modèles catégorisés selon leur communauté d'appartenance .....	65
1.1.6 Une catégorisation hybride des modèles.....	66

1.2	Vers une définition du concept de modèle .....	67
1.2.1	Un modèle est une représentation simplifiée d'une entité du monde réel .....	67
1.2.2	Un modèle est un outil de pensée intermédiaire entre deux mondes pour la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes .....	71
1.2.3	Un modèle peut être représenté par une grande diversité de registres de représentation sémiotique .....	79
1.2.4	Différents modèles peuvent représenter un même référent et un même modèle peut représenter plusieurs référents .....	82
1.2.5	Un modèle est assujéti à des révisions .....	83
2.	LE CONCEPT DE MODÉLISATION .....	85
2.1	La modélisation comme processus de mise en relation entre deux mondes .....	85
2.2	La modélisation comme démarche d'investigation scientifique particulière .....	95
2.2.1	La démarche de modélisation inductiviste-applicationniste .....	96
2.2.3	Proposition d'une démarche de modélisation constructiviste .....	98
2.2.3.1	La phase Problématiser .....	101
2.2.3.2	La phase Planifier .....	108
2.2.3.3	La phase Investiguer .....	109
2.2.3.4	La phase Conceptualiser et déployer .....	111
3.	LA MODÉLISATION DANS LE CONTEXTE DE LA CINÉMATIQUE DU POINT MATÉRIEL : LES CONCEPTS FONDAMENTAUX .....	114
3.1	Le point matériel .....	115
3.2	Le référentiel .....	115
3.3	Les variables permettant de modéliser mathématiquement le mouvement des objets matériels .....	119
4.	LA CINÉMATIQUE COMME DOMAINE RICHE POUR LA CONSTRUCTION DE MODÈLES ET L'ACQUISITION DE SAVOIRS CONCEPTUELS .....	122
4.1	Le mouvement rectiligne uniforme .....	123
4.2	Le mouvement rectiligne non uniforme .....	124
4.3	Le mouvement balistique .....	128
4.4	Des facettes de savoir pour accéder à la compréhension des phénomènes physiques par les élèves .....	130

5.	LE CONCEPT DE PRATIQUE D'ENSEIGNEMENT .....	134
5.1	La distinction entre pratique enseignante et pratique d'enseignement .....	135
5.2	La pratique d'enseignement comme activité finalisée .....	136
5.3	La pratique d'enseignement comme activité universelle et singulière .....	137
5.4	La pratique d'enseignement comme action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage .....	138
5.5	La pratique d'enseignement comme activité multimodale.....	139
5.6	La pratique d'enseignement comme activité multidimensionnelle.....	140

### **TROISIÈME CHAPITRE : LE CADRE D'ANALYSE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ORDINAIRES DES MODÈLES ET DE LA MODÉLISATION.... 142**

1.	LA DIMENSION CONCEPTUELLE.....	143
2.	LA DIMENSION FONCTIONNELLE.....	144
3.	LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE .....	144
3.1	Le quoi enseigner .....	145
3.2	Le comment enseigner ce qui sera enseigné.....	146
3.2.1	La chronogénèse, la topogénèse et la mésogénèse pour caractériser les pratiques d'enseignement aux échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique .....	147
3.2.2	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique .....	148
3.2.3	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique .....	148
3.2.4	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique .....	149
3.2.4.1	L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des facettes de savoir.....	149
3.2.4.2	L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des tâches épistémiques .....	150
3.3	Le avec quoi enseigner .....	151

4.	LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE .....	152
5.	LES QUESTIONS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE .....	153

### **QUATRIÈME CHAPITRE : LA MÉTHODOLOGIE..... 154**

1.	LA CONSTRUCTION DE L'ÉCHANTILLON.....	156
1.1	La stratégie d'échantillonnage.....	156
1.2	Le processus de recrutement des enseignants.....	158



1.3	Les caractéristiques de l'échantillon .....	159
2.	LES PROCÉDURES DE RECUEIL DES DONNÉES .....	159
2.1	Les entrevues pré et postenregistrement .....	160
2.2	L'enregistrement vidéo des séquences d'enseignement en classe .....	167
2.3	Les artéfacts utilisés dans les pratiques d'enseignement.....	172
2.4	Le questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves de 5 <sup>e</sup> secondaire en physique cinématique .....	173
3.	LES PROCÉDURES D'ANALYSE DES DONNÉES.....	174
3.1	Le traitement des données issues des entrevues pré et postenregistrement.....	175
3.2	Le traitement des données issues des enregistrements vidéos des séquences d'enseignement .....	179
3.2.1	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique .....	180
3.2.2	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique .....	182
3.2.2.1	Les thèmes et sous-thèmes disciplinaires.....	183
3.2.2.2	Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires.....	187
3.2.2.3	Les phases de la démarche de modélisation.....	188
3.2.2.4	Les ressources didactiques utilisées .....	189
3.2.2.5	Les modalités d'organisation de la classe .....	191
3.2.2.6	Le synopsis comme enchaînement d'épisodes structurés par les indicateurs d'ordre mésoscopique .....	194
3.2.3	L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique .....	195
3.2.3.1	L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des tâches épistémiques.....	197
3.2.3.2	L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des facettes de savoir.....	206
3.3	Le traitement des données issues du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique.....	217
	<b>CINQUIÈME CHAPITRE : LES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE.....</b>	<b>222</b>
1.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1.....	222
1.1	Conception d'un modèle chez l'enseignante 1 .....	222
1.2	Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1 .....	225
2.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1.....	227

3.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1.....	230
3.1	La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle macroscopique.....	230
3.2	La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle mésoscopique .....	233
3.2.1	Les thèmes et sous-thèmes disciplinaires.....	233
3.2.2	Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires.....	234
3.2.3	Les phases de la démarche de modélisation.....	235
3.2.4	Les ressources didactiques utilisées.....	236
3.2.5	Les modalités d'organisation de la classe .....	239
3.2.6	Les synopsis des séances de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	240
3.3	La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle microscopique .....	245
3.3.1	Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des tâches épistémiques .....	245
3.2.2	Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des tâches épistémiques .....	259
3.2.3	Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des facettes de savoir.....	260
3.2.3.1	Groupe de facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne).....	267
3.2.3.2	Groupe de facettes ACCÉLÉRATION (accélération, accélération instantanée et accélération moyenne) .....	274
3.2.3.3	Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU).....	285
3.2.3.4	Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA).....	292
3.2.4	Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des facettes de savoir.....	300
4.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1.....	302
5.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2.....	312
5.1	Conception d'un modèle chez l'enseignant 2.....	312
5.2	Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2.....	316

6.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2.....	319
7.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2.....	324
7.1	La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle macroscopique .....	324
7.2	La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle mésoscopique.....	328
7.2.1	Les thèmes disciplinaires .....	328
7.2.2	Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires.....	329
7.2.3	Les phases de la démarche de modélisation.....	333
7.2.4	Les ressources didactiques utilisées.....	335
7.2.5	Les modalités d'organisation de la classe .....	337
7.2.6	Les synopsis des séances de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	339
7.3	La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle microscopique .....	348
7.3.1	Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des tâches épistémiques .....	348
7.3.2	Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des tâches épistémiques .....	367
7.3.3	Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des facettes de savoir .....	369
7.3.3.1	Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU).....	374
7.3.3.2	Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA).....	380
7.3.3.3	Groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE .....	387
7.3.4	Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des facettes de savoir .....	393
8.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2.....	395
9.	RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA RELATION ENTRE PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET ACQUISITIONS CONCEPTUELLES CHEZ LES ENSEIGNANTS 1 ET 2 .....	410
9.1	Résultats associés la question 2 du questionnaire d'enquête.....	411
9.2	Résultats associés aux questions 3, 4, 5 et 6 du questionnaire d'enquête .....	412

9.3	Résultats associés aux questions 7, 8, 9, 10 et 11 du questionnaire d'enquête .....	416
9.4	Résultats associés aux questions 12 et 13 du questionnaire d'enquête.....	421
9.5	Résultats associés aux questions 14 et 15 du questionnaire d'enquête.....	423
9.6	Résultats associés à la question 16 du questionnaire d'enquête.....	426
9.7	Résultats associés aux questions 17 et 18 du questionnaire d'enquête.....	427
9.8	Résultats associés à la question 19 du questionnaire d'enquête.....	430
9.9	Résultats associés aux questions 20, 21 et 22 du questionnaire d'enquête .....	431
9.10	Résultats associés à la question 23 du questionnaire d'enquête.....	434
9.11	Résultats associés aux questions 24, 25 et 26 du questionnaire d'enquête .....	436
9.12	Résultats associés à la question 27 du questionnaire d'enquête.....	438
<b>SIXIÈME CHAPITRE : SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS .....</b>		<b>440</b>
1.	SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS.....	440
1.1	Quelles significations attribuées au concept de modèle en sciences par les enseignants ?.....	440
1.2	Quelles significations attribuées à la démarche de modélisation par les enseignants ?.....	444
2.	SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS.....	448
3.	SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS.....	453
3.1	Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle macroscopique ?.....	453
3.2	Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle mésoscopique ? .....	456
3.3	Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle microscopique ? .....	462
3.3.1	Des configurations significativement différentes selon les tâches épistémiques.....	462
3.3.2	Des configurations significativement différentes selon les facettes de savoir.....	470

4.	SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS .....	476
4.1	Quels défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves ? .....	476
4.2	Quels défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant ? .....	479
4.3	Quels facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?.....	480
4.4	Quels facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?.....	482
4.	SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA RELATION ENTRE PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET ACQUISITIONS CONCEPTUELLES CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS .....	483
<b>CONCLUSION.....</b>		<b>489</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>		<b>502</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Cinq attributs caractéristiques d'un modèle en sciences.....	84
Tableau 2 : Définition sommaire des tâches épistémiques en jeu dans les deux séquences d'enseignement.....	200
Tableau 3 : Répartition des tâches épistémiques en jeu dans les séquences d'enseignement des deux enseignants selon les six domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl.....	201
Tableau 4 : Exemples de tâches épistémiques Évaluer selon les trois registres de modélisation.....	203
Tableau 5 : Appréciation du niveau de facilité de la physique cinématique par les élèves des deux groupes.....	219
Tableau 6 : Sentiment de compétence d'élèves en physique cinématique dans les deux groupes.....	219
Tableau 7 : Conception d'un modèle chez l'enseignante 1.....	224
Tableau 8 : Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	227
Tableau 9 : Finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique selon l'enseignante 1.....	229
Tableau 10 : Thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	234
Tableau 11 : Contextes de traitement des thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus).....	235
Tableau 12 : Laboratoires et épisodes couverts en lien avec la démarche de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	236
Tableau 13 : Ressources didactiques utilisées dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus).....	238
Tableau 14 : Ressources didactiques utilisées selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	238
Tableau 15 : Modalités d'organisation de la classe dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus).....	239
Tableau 16 : Modalités d'organisation de la classe selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus).....	239
Tableau 17 : Synopsis simplifié de la séance 1 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	240
Tableau 18 : Synopsis simplifié de la séance 2 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	241
Tableau 19 : Synopsis simplifié de la séance 3 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	241
Tableau 20 : Synopsis simplifié de la séance 4 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	242
Tableau 21 : Synopsis simplifié de la séance 5 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	242
Tableau 22 : Synopsis simplifié de la séance 6 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	243
Tableau 23 : Synopsis simplifié de la séance 7 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	243
Tableau 24 : Synopsis simplifié de la séance 8 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	243
Tableau 25 : Synopsis simplifié de la séance 9 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	244
Tableau 26 : Synopsis simplifié de la séance 10 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	244
Tableau 27 : Synopsis simplifié de la séance 11 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	245
Tableau 28 : Densité des tâches épistémiques (nombre de tâches épistémiques par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	248
Tableau 29 : Densité des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignante 1.....	263
Tableau 30 : Densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	263
Tableau 31 : Densité des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les séances chez l'enseignante 1.....	269
Tableau 32 : Densité des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	269
Tableau 33 : Densité des facettes Accélération selon les séances chez l'enseignante 1.....	276
Tableau 34 : Densité des facettes Accélération selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	276
Tableau 33 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les séances chez l'enseignante 1.....	286
Tableau 34 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	286
Tableau 37 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les séances chez l'enseignante 1.....	294
Tableau 38 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	294

Tableau 39 : Défis et difficultés associées à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1 .....	303
Tableau 40 : Défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation (du côté de l'enseignant) selon l'enseignante 1 .....	309
Tableau 41 : Facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1 .....	311
Tableau 42 : Facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1 .....	312
Tableau 43 : Conception d'un modèle chez l'enseignant 2 .....	314
Tableau 44 : Finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique selon l'enseignant 2 .....	321
Tableau 45 : Thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	329
Tableau 46 : Contextes de traitement des thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus) .....	332
Tableau 47 : Laboratoires et épisodes couverts en lien avec la démarche de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous les laboratoires confondus) .....	334
Tableau 48 : Ressources didactiques utilisées dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus) .....	336
Tableau 49 : Ressources didactiques utilisées selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence de l'enseignant 2 .....	337
Tableau 50 : Modalités d'organisation de la classe dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus) .....	338
Tableau 51 : Modalités d'organisation de la classe selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus) .....	338
Tableau 52 : Densité des tâches épistémiques (nombre de tâches épistémiques par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	351
Tableau 53 : Densité des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignant 2 .....	371
Tableau 54 : Densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	371
Tableau 55 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les séances chez l'enseignant 2 ...	376
Tableau 56 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	376
Tableau 57 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les séances chez l'enseignant 2 .....	381
Tableau 58 : Densité des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	381
Tableau 59 : Densité des facettes Mouvement balistique selon les séances chez l'enseignant 2 .....	388
Tableau 60 : Densité des facettes Mouvement balistique selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	389
Tableau 61 : Défis et difficultés associées à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2 .....	400
Tableau 62 : Défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant selon l'enseignant 2 .....	404
Tableau 63 : Facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2 .....	406
Tableau 64 : Facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2 .....	409
Tableau 65 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 2 du questionnaire d'enquête .....	412
Tableau 66 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 3 du questionnaire d'enquête .....	413
Tableau 67 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 4 du questionnaire d'enquête .....	414
Tableau 68 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 5 du questionnaire d'enquête .....	415
Tableau 69 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 6 du questionnaire d'enquête .....	416

Tableau 70 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 7 du questionnaire d'enquête.....	417
Tableau 71 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 8 du questionnaire d'enquête.....	418
Tableau 72 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 9 du questionnaire d'enquête.....	419
Tableau 73 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 10 du questionnaire d'enquête.....	420
Tableau 74 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 11 du questionnaire d'enquête.....	421
Tableau 75 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 12 du questionnaire d'enquête.....	422
Tableau 76 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 13 du questionnaire d'enquête.....	423
Tableau 77 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 14 du questionnaire d'enquête.....	424
Tableau 78 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 15 du questionnaire d'enquête.....	426
Tableau 79 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 16 du questionnaire d'enquête.....	427
Tableau 80 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 17 du questionnaire d'enquête.....	428
Tableau 81 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 18 du questionnaire d'enquête.....	429
Tableau 82 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 19 du questionnaire d'enquête.....	431
Tableau 83 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 20 du questionnaire d'enquête.....	432
Tableau 84 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 21 du questionnaire d'enquête.....	433
Tableau 85 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 22 du questionnaire d'enquête.....	434
Tableau 86 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 23 du questionnaire d'enquête.....	435
Tableau 87 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 24 du questionnaire d'enquête.....	436
Tableau 88 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 25 du questionnaire d'enquête.....	437
Tableau 89 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 26 du questionnaire d'enquête.....	438
Tableau 90 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 27 du questionnaire d'enquête.....	439
Tableau 91 : Fréquence d'apparition totale et proportion de temps mobilisée par les 21 tâches épistémiques dans les 2 séquences d'enseignement réparties selon les 6 domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl.....	466
Tableau 92 : Prise en charge des 21 tâches épistémiques par les acteurs de la classe selon les 6 domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl.....	468
Tableau 93 : Matrices de relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves en cinématique dans les deux séquences d'enseignement.....	487
Tableau 94 : Matrices des relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves en cinématique dans les deux séquences d'enseignement (suite).....	488



## LISTE DES FIGURES

Figure 1- La compétence « Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 3).....	44
Figure 2- Orientations et concepts prescrits associés au domaine de la cinématique dans le nouveau programme de physique de 5e secondaire (Gouvernement du Québec, 2009, p. 22).....	46
Figure 3- La théorie et le phénomène dans un rapport de nature dialectique (Robardet et Guillaud, 1997) .....	70
Figure 4- La dynamique de la modélisation scientifique Walliser (1977) .....	86
Figure 5- Articulation entre référent empirique et registre des modèles et proposition d'un schéma de la modélisation de Martinand (1996, p. 7 et 10).....	88
Figure 6- Distinction entre deux mondes fondée sur la modélisation en physique (Tiberghien, 1994).....	89
Figure 7- La théorie spécifique des deux mondes mettant en relation-tension les concepts de sens commun et les concepts scientifiques (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011, p. 207).....	91
Figure 8- Une démarche de modélisation constructiviste .....	100
Figure 9- Structure cognitive d'un modèle mental d'un phénomène physique (Hestenes, 2010, p. 10) .....	107
Figure 10- Description du mouvement de clés qui tombent par des observateurs situés dans des deux référentiels distincts (Hecht, 2000, p. 121) .....	116
Figure 11- Repère de temps illustrant la durée entre deux instants 1 et 2 correspondant à la différence de leur date $t_2 - t_1$ (Gibaud et Henry, 1999, p. 3) .....	118
Figure 12- Référentiel d'étude (Gibaud et Henry, 1999, p. 4).....	119
Figure 13- Trajectoire d'un point matériel entre les points M et M' dans le référentiel R (adaptation de Gibaud et Henry, 1999, p. 5) .....	120
Figure 14- Déplacement du point matériel M au point M' dans le référentiel R (adaptation de Gibaud et Henry, 1999, p. 5) .....	120
Figure 15- Graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniforme (Alonso et Finn, 1986, p. 81) .....	124
Figure 16- Graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniformément accéléré (Alonso et Finn, 1986, p. 82).....	125
Figure 17- Point de rencontre d'un projectile et d'un animal en peluche libérés simultanément (Kane et Sternheim, 1997, p. 34).....	129
Figure 18- Dimensions du concept d'intervention éducative (Lenoir et Vanhulle, 2006, p. 230).....	141
Figure 19- La pratique d'enseignement : une construction du chercheur sur la base de la pratique déclarée et de la pratique observée .....	161
Figure 20- Exemple de transcription d'un extrait d'un enregistrement vidéo dans la phase de préanalyse (Enseignante 1, séance 1).....	172
Figure 21- Comparaison entre l'ancienne taxonomie de Bloom et la taxonomie révisée de Bloom (Wilson, 2013). .....	199
Figure 22- Exemple de codage de deux facettes conceptuelles sur le signe de la variation de la vitesse dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	210
Figure 23- Cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en physique .....	221
Figure 24- Réseau des savoirs en relation avec les laboratoires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	232
Figure 25- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	246
Figure 26- Durée totale (en minutes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	247
Figure 27- Durée moyenne (en secondes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	247
Figure 28- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	248
Figure 29- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	249
Figure 30- Prise en charge des tâches épistémiques (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 .....	250

Figure 31- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon leur prise en charge (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	250
Figure 32- Registres de modélisation (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	251
Figure 33- Distribution des tâches épistémiques selon les registres de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	252
Figure 34- Tâche épistémique Évaluer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	253
Figure 35- Tâche épistémique Expliquer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	254
Figure 36- Tâche épistémique Décrire selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	255
Figure 37- Tâche épistémique Énoncer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante.....	256
Figure 38- Tâche épistémique Interpréter selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	257
Figure 39- Tâche épistémique Définir selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	258
Figure 40- Tâche épistémique Faire des opérations formelles selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.....	259
Figure 41- Distribution des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignante 1.....	261
Figure 42- Distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	262
Figure 43- Distribution des groupes de facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	264
Figure 44- Distribution des groupes de facettes selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1.....	265
Figure 45- Distribution des groupes de facettes selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	265
Figure 46- Distribution des groupes de facettes selon leurs types chez l'enseignante 1.....	266
Figure 47- Distribution des groupes de facettes selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1.....	267
Figure 48- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les séances chez l'enseignante 1.....	268
Figure 49- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	268
Figure 50- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante.....	269
Figure 51- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1.....	270
Figure 52- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	270
Figure 53- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon leurs types chez l'enseignante 1.....	270
Figure 54- Distribution des facettes Vitesse (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1.....	271
Figure 55- Interprétation de la variation de la position de la situation fictive d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7).....	274
Figure 56- Distribution des facettes Accélération selon les séances chez l'enseignante 1.....	275
Figure 57- Distribution des facettes Accélération selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	275
Figure 58- Distribution des facettes Accélération selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	276
Figure 59- Distribution des facettes Accélération selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1.....	277
Figure 60- Distribution des facettes Accélération selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	277
Figure 61- Distribution des facettes Accélération selon leurs types chez l'enseignante 1.....	278
Figure 62- Distribution des facettes Accélération selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1.....	278
Figure 63- Définition de l'accélération en s'appuyant sur le cahier d'apprentissage (enseignante 1, séance 2).....	280

Figure 64- Construction de la signification des signes de l'accélération par les quatre situations fictives (enseignante 1, séance 2).....	281
Figure 65- Exemplification d'une accélération négative horizontale par une démonstration expérimentale (enseignante 1, séance 2).....	281
Figure 66- Représentation de l'évolution de la position d'une voiture en MRUA selon le temps par le cahier d'apprentissage (enseignante 1, séance 7).....	282
Figure 67- Interprétation du signe de l'accélération d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7).....	283
Figure 68- Interprétation du signe de l'accélération d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7).....	283
Figure 69- Explication de la procédure pour construire un graphique accélération-temps d'un mobile en MRUA à partir de son graphique vitesse-temps (enseignante 1, séance 7).....	284
Figure 70- Exemplification de deux événements par une démonstration expérimentale impliquant des accélérations négatives horizontales (enseignante 1, séance 10).....	284
Figure 71- Exemplification de deux événements par une démonstration expérimentale impliquant des accélérations négatives verticales (enseignante 1, séance 10).....	285
Figure 72- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les séances chez l'enseignante 1.....	285
Figure 73- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	286
Figure 74- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	287
Figure 75- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1.....	287
Figure 76- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	287
Figure 77- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon leurs types chez l'enseignante 1.....	288
Figure 78- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1.....	288
Figure 79- Représentation et description de l'accélération d'une voiture en MRU dans le sens de référence par une relation nulle (droite horizontale nulle) (enseignante 1, séance 10).....	290
Figure 80- Description des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU dans le sens de référence (enseignante 1, séance 11).....	292
Figure 81- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les séances chez l'enseignante 1.....	293
Figure 82- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	293
Figure 83- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1.....	294
Figure 84- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1.....	295
Figure 85- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1.....	295
Figure 86- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon leurs types chez l'enseignante 1.....	295
Figure 87- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1.....	296
Figure 88- Interprétation de variation de la vitesse régulière d'une balle dans son mouvement ascendant et descendant (enseignante 1, séance 10).....	298
Figure 89- Explication d'adaptations mineures des formules générales du MRUA (enseignante 1, séance 10).....	299
Figure 90- Généralisation des équations du mouvement d'un objet en chute libre (enseignante 1, séance 10).....	299
Figure 91- Réseau des savoirs en relation avec les laboratoires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2.....	327
Figure 92- Explications spécifiques sur le fonctionnement d'instruments de mesure dans les 8 laboratoires sur la cinématique et la dynamique (séance 1, ens. 2).....	341

Figure 93- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	349
Figure 94- Durée totale (en minutes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	350
Figure 95- Durée moyenne (en secondes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	350
Figure 96- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	351
Figure 97- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	352
Figure 98- Prise en charge des tâches épistémiques (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	353
Figure 99- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon leur prise en charge (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	354
Figure 100- Registres de modélisation (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	355
Figure 101- Distribution des tâches épistémiques selon les registres de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	356
Figure 102- Tâche épistémique Évaluer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	357
Figure 103- Tâche épistémique Décrire selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	358
Figure 104- Tâche épistémique Expliquer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	360
Figure 105- Tâche épistémique Identifier selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	361
Figure 106- Tâche épistémique Énoncer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	362
Figure 107- Tâche épistémique Comparer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	363
Figure 108- Tâche épistémique Faire des opérations formelles selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 .....	365
Figure 109- Tâche épistémique Générer selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (facettes) .....	365
Figure 110- Distribution des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignant 2 .....	369
Figure 111- Distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	370
Figure 112- Distribution des groupes de facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	372
Figure 113- Distribution des groupes de facettes selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2 .....	372
Figure 114- Distribution des groupes de facettes selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2 .....	373
Figure 115- Distribution des groupes de facettes selon leurs types chez l'enseignant 2 .....	373
Figure 116- Distribution des groupes de facettes selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2 .....	374
Figure 117- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les séances chez l'enseignant 2 .....	375
Figure 118- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	375
Figure 119- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2 .....	376
Figure 120- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2 .....	377
Figure 121- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2 .....	377
Figure 122- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon leurs types chez l'enseignant 2 .....	377

Figure 123- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniforme (MRU) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2.....	378
Figure 124- Représentation et description des tracés des graphiques distance-temps, vitesses-temps et accélération-temps dans un MRU par les élèves du laboratoire C (séance 8, ens. 2).....	380
Figure 125- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les séances chez l'enseignant 2.....	380
Figure 126- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2.....	381
Figure 127-Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2.....	382
Figure 128- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2 .....	382
Figure 129- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2 .....	383
Figure 130- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon leurs types chez l'enseignant 2.....	383
Figure 131- Distribution des facettes Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2 .....	384
Figure 132- Description et comparaison du tracé du graphique distance-temps dans les milieux air et eau par les élèves du laboratoire F (séance 13, ens. 2).....	387
Figure 133- Distribution des facettes Mouvement balistique selon les séances chez l'enseignant 2 .....	388
Figure 134- Distribution des facettes Mouvement balistique selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2....	388
Figure 135- Distribution des facettes Mouvement balistique selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2.....	389
Figure 136- Distribution des facettes Mouvement balistique selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2.	390
Figure 137- Distribution des facettes Mouvement balistique selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2.....	390
Figure 138- Distribution des facettes Mouvement balistique selon leurs types chez l'enseignant 2 .....	390
Figure 139- Distribution des facettes Mouvement balistique selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2 .....	391
Figure 140- Description et comparaison de la variation de la position y entre une balle en chute libre et une balle suivant un mouvement balistique par les élèves du laboratoire G (séance 14, ens. 2).....	393
Figure 141- Composantes verticale et horizontale du vecteur vitesse dans un mouvement balistique déduites par les élèves du laboratoire G (séance 14, ens. 2).....	393
Figure 142- Aperçu mésoscopique de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 .....	461
Figure 143- Aperçu mésoscopique de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2.....	462

## REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse de doctorat a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je désire témoigner toute ma reconnaissance.

En tout premier lieu, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse, le Pr Abdlekrim Hasni, pour son soutien inestimable, sa patience, sa disponibilité et ses judicieux conseils tout au long de mon parcours académique, et ce, depuis le premier jour de mes études de maîtrise.

En second lieu, je tiens à exprimer ma gratitude à mon codirecteur de thèse, le Pr Dominique Lefebvre, qui a contribué à alimenter ma réflexion au moment de la construction des outils méthodologiques.

J'exprime toute ma reconnaissance envers les deux enseignants qui ont accepté de participer à la collecte des données. Un tout grand merci à Vincent Belletête, alors étudiant à la maîtrise, qui m'a soutenu dans le travail gigantesque de transcription des données vidéos.

Je remercie fortement les membres de mon jury, plus particulièrement le Pr Jean-Marie Boilevin, la Pre Audrey Groleau et la Pre Otilia Popescu Holgado, pour leurs précieux commentaires qui ont permis d'améliorer ce manuscrit. Aussi, un grand merci à Christiane Joye-Wicki, professeure retraitée de la Haute école pédagogique Fribourg, pour son travail de révision linguistique.

Je tiens aussi à remercier le Fonds de recherche du Québec – Société et culture (FRQSC), le Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH) et le Centre de recherche sur l'enseignement et l'apprentissage des sciences de l'Université de Sherbrooke (CREAS) pour le soutien financier accordé tout au long de mes études doctorales, ainsi que mes employeurs, la Commission scolaire des Navigateurs et la Haute école Pédagogique Fribourg pour la souplesse accordée quant à mon horaire de travail.

Enfin, je tiens à exprimer mes plus chaleureux remerciements envers ma famille, mes amis et collègues pour leurs encouragements et leur support moral pendant ces nombreuses années. Si tant d'entre eux méritent ici d'être nommés, le premier à remercier est mon conjoint François, pour qui tant de soirées et de fins de semaine ont été habitées par ce projet d'envergure et dont le support psychologique m'a été essentiel.

## INTRODUCTION

Cette recherche doctorale de nature exploratoire et descriptive consiste en une étude de cas multiples qui porte sur les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation de deux enseignants québécois de physique de 5<sup>e</sup> secondaire en vue de les relier aux apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique. Elle s'inscrit dans la foulée des travaux réalisés dans le monde francophone qui considèrent les pratiques d'enseignement du point de vue des actions conjointes de l'enseignant et des élèves en accordant une place centrale aux savoirs disciplinaires dans l'organisation de ces pratiques, et dans la continuité des travaux qui permettent d'établir de fortes relations entre les spécificités des pratiques d'enseignement et les acquisitions conceptuelles chez les élèves. Son objet d'étude est lié à la thématique du *Centre de recherche sur l'enseignement et l'apprentissage des sciences de l'Université de Sherbrooke* (CREAS) qui porte sur des problématiques d'enseignement et d'apprentissage des disciplines scientifiques à l'école, en considérant, notamment, les enjeux cognitifs liés aux démarches d'enseignement dans leur relation avec les apprentissages des élèves. Elle vise plus particulièrement l'axe 1 qui concerne les démarches d'enseignement-apprentissage propres aux disciplines scientifiques, en l'occurrence, la démarche de modélisation dans l'enseignement de la physique. L'objectif de cette thèse est de caractériser et comparer la singularité des pratiques d'enseignement de deux enseignants de manière à dégager leur potentialité sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique (chute libre, mouvements d'objets matériels sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.). Cette différenciation nous conduit à relier certaines caractéristiques des pratiques de modélisation favorables aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Six chapitres structurent cette thèse.

Dans le premier chapitre, la problématique, nous abordons les notions de modèle et de modélisation dans la communauté scientifique, plus particulièrement en physique. Puis, nous traitons de la place de ces objets de savoir dans l'éducation scientifique en mettant en évidence les principales finalités éducatives qui leur sont associées. Par la suite, nous discutons de la place qu'occupent ces objets d'étude parmi les composantes d'enseignement et d'apprentissage du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire structuré autour d'une approche par compétences. La problématique se clôture par un argumentaire visant à justifier la pertinence scientifique et sociale

de réaliser notre recherche sur les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation dans le domaine de cinématique. Ici, nous donnons un aperçu des principaux travaux de recherche réalisés sur ces mêmes objets d'étude au cours de deux dernières décennies en mettant en évidence certaines zones encore inexplorées, et nous formulons notre objectif général de recherche.

Dans le deuxième chapitre, le cadre conceptuel, nous développons les trois concepts-clés qui structurent notre recherche : les concepts de modèle, de modélisation et de pratique d'enseignement. Notre analyse de la documentation scientifique, en se basant en particulier sur le point de vue des épistémologues, a permis de dégager cinq attributs essentiels pour caractériser le concept de modèle en sciences et sa transposition didactique dans l'éducation scientifique. Dans la seconde partie du cadre conceptuel, nous définissons la modélisation sous deux angles : celui d'un processus mettant en relation le monde concret et le monde conceptuel, d'une part, celui d'une démarche d'investigation scientifique particulière en distinguant deux orientations théoriques possibles : la démarche de modélisation inductiviste-applicationniste et la démarche de modélisation constructiviste. Ces deux démarches se distinguent par leurs configurations emblématiques en portant des éclairages distincts sous plusieurs aspects : leur paradigme de référence, les finalités de l'expérimentation scientifique, le statut conféré au modèle ainsi qu'aux connaissances initiales des élèves dans le processus de problématisation. En nous appuyant sur plusieurs travaux portant sur les démarches de modélisation en physique, ainsi que sur les construits de problématisation, de contextualisation, de conceptualisation et de démarche d'investigation scientifique, nous développons une démarche de modélisation constructiviste cyclique s'articulant autour de quatre phases dynamiques : *problématiser* ; *planifier* ; *investiguer*, *conceptualiser et déployer*. Dès lors, les troisième et quatrième parties du cadre conceptuel sont consacrées à exposer les spécificités de la modélisation dans le contexte de la cinématique du point matériel en convoquant les concepts fondamentaux (point matériel, référentiel, variables du mouvement) nécessaires à la modélisation des phénomènes physique par les modèles du mouvement rectiligne uniforme, du mouvement rectiligne uniformément accéléré et du mouvement balistique. Une analyse conceptuelle du domaine de la cinématique permet ensuite d'introduire le concept de facettes de savoirs pour accéder à la compréhension des phénomènes physiques par les élèves. Enfin, dans la cinquième partie, nous définissons la pratique d'enseignement comme une activité



finalisée, à la fois universelle et singulière, multimodale, multidimensionnelle et que nous appréhendons comme une action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage. Mis en relation, les concepts-clés de ce cadre conceptuel permettent d'opérationnaliser un cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans le champ de la physique.

Dans le cadre d'analyse présenté au troisième chapitre, nous développons quatre dimensions d'analyse des pratiques d'enseignement (conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle, et organisationnelle), plus particulièrement la dimension opérationnelle qui est au cœur de ce cadre et qui vise à explorer la manière dont les modèles et la modélisation s'opérationnalisent dans les pratiques d'enseignement. Dans cette dimension qui renvoie notamment au *comment enseigner ce qui sera enseigné*, nous exposons trois concepts méthodologiques importants pour caractériser les pratiques d'enseignement : la chronogénèse, la topogénèse et la mésogénèse. Puis, nous décrivons trois échelles du temps didactique avec lesquelles nous réalisons nos analyses : les échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique. De ces quatre dimensions d'analyse découlent cinq questions spécifiques de recherche visant à décrire et caractériser les spécificités des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en vue de les relier aux apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique.

Dans le quatrième chapitre, la méthodologie, nous décrivons dans un premier temps la stratégie d'échantillonnage, le processus de recrutement des enseignants et les caractéristiques de notre échantillon. Dans un second temps, nous exposons les diverses procédures de collecte des données en lien avec les cinq questions spécifiques de recherche. Nous considérons la pratique d'enseignement comme une construction du chercheur sur la base de la pratique déclarée et de la pratique observée. Ce choix épistémologique et méthodologique nous conduit à expliciter nos outils de collecte de données, ainsi que leurs apports et leurs limites en fonction de nos intentions de recherche. Dans un troisième temps, nous expliquons les procédures d'analyse des données selon les outils de collecte de données. Dans une première visée du cadre d'analyse, sous l'angle de la dimension opérationnelle de la pratique, nous rendons compte de manière détaillée des procédures d'analyse utilisées pour décrire et caractériser les spécificités des pratiques d'enseignement des deux enseignants sur les trois échelles du temps didactique. Plus précisément, nous détaillons cinq indicateurs d'ordre mésoscopique (les thèmes disciplinaires abordés dans les

séances, leurs contextes de traitement, les phases de la démarche de modélisation en référence avec celle développée dans le cadre conceptuel, les ressources didactiques utilisées et les modalités d'organisation de la classe) et huit indicateurs d'ordre microscopique, dont cinq pour analyser les facettes de savoir (la continuité du savoir, la densité du savoir, l'ancrage des facettes de savoir dans le contexte de traitement des thèmes disciplinaires, la source d'émergence du savoir, l'ancrage des facettes de savoir dans les phases de la démarche de modélisation) et trois pour analyser les tâches épistémiques permettant la construction de ces facettes (la nature des tâches épistémiques et leur niveau de complexité, les registres de modélisation mobilisés dans les tâches épistémiques, la prise en charge des tâches épistémiques par les acteurs de la classe). Dans une seconde visée du cadre d'analyse, toujours sous l'angle de la dimension opérationnelle de la pratique, nous décrivons la procédure de traitement des données issues du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique, et ce, de manière à déterminer des configurations des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation favorisant les acquisitions conceptuelles chez les élèves.

Dans le cinquième chapitre, nous présentons de manière disjointe les résultats associés aux quatre dimensions d'analyse retenues chez les deux enseignants. Les résultats relatifs aux dimensions conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle de la pratique sont accompagnés de plusieurs extraits significatifs permettant d'illustrer les catégories de sens produites. En regard de la dimension opérationnelle de la pratique qui au cœur de notre cadre d'analyse, sont présentés pour l'analyse : 1) à l'échelle macroscopique, des réseaux mettant en évidence de manière synthétique les relations entre le savoir enseigné et les laboratoires dans les séquences d'enseignement ; 2) à l'échelle mésoscopique, des synopsis décrivant de manière chronologique les pratiques d'enseignement selon les cinq indicateurs d'ordre mésoscopique. Ces descriptions succinctes par épisodes, réalisées pour chacune des séances, servent à contextualiser les résultats à l'échelle microscopique. Elles sont mises en relation avec les intentions d'enseignement exprimées par les enseignants au chercheur dans les entrevues pré et postenregistrement ou celles exprimées directement aux élèves par les enseignants lors des séances ; 3) à l'échelle microscopique, une caractérisation des pratiques sous l'angle des tâches épistémiques et des facettes de savoir. Dans un premier temps, nous donnons un aperçu des pratiques d'enseignement sous l'angle des tâches épistémiques en mettant en évidence leur fréquence d'apparition et leur densité (tous les thèmes

disciplinaires confondus ou pour des thèmes disciplinaires particuliers), leur durée moyenne, leur prise en charge par les acteurs de la classe et leur distribution selon les registres de modélisation mobilisés. Puis, nous explicitons la manière dont ces tâches sont mobilisées pour caractériser les pratiques d'enseignement en mettant en exergue leur modalité de prise en charge par les acteurs de la classe et en fournissant des exemples de leur mobilisation pour chacun de registres de modélisation impliqués. De point de vue des facettes de savoir, nous donnons dans un premier temps un aperçu de la distribution et de la densité des groupes de facettes de savoir dans les séances (tous les thèmes disciplinaires confondus ou pour des thèmes disciplinaires particuliers), de leur distribution selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, de leurs sources d'émergence, des phases de la démarche de modélisation dans lesquelles elles sont ancrées, des principaux types de facettes en jeu et de la responsabilité des acteurs qui les prennent en charge. Dans un second temps, nous présentons de manière détaillée comment ces divers groupes de facettes de savoir sont mobilisés dans les pratiques d'enseignement en mettant en exergue les facettes les plus fréquemment mobilisées, soit celles dont la continuité est la plus forte. Tous les résultats sont accompagnés d'exemples typiques de facettes mis en relation avec les tâches épistémiques qui les portent et situés dans les épisodes qui structurent les synopsis construits à l'échelle mésoscopique. Enfin, pour le second volet d'analyse des pratiques d'enseignement, nous comparons la distribution des réponses et le pourcentage de réussite des élèves pour chacune des questions du questionnaire d'enquête, et nous mettons en relation ces informations avec des matrices de facettes de savoir simplifiées associées à ces questions. Dans ce chapitre, en plus de rendre compte d'analyses de pratiques d'enseignement dans une perspective multidimensionnelle, nous les caractérisons à plusieurs échelles du temps didactique, et ce, au moyen d'un nombre important d'indicateurs. Plusieurs indications en vue d'approfondir la réflexion sont présentées dans les annexes.

Dans le sixième chapitre relatif à la discussion des résultats, nous effectuons une synthèse des résultats en comparant les pratiques d'enseignement des deux enseignants et en les interprétant à la lumière de la problématique, du cadre conceptuel et d'autres travaux, notamment, dans le champ de la didactique des sciences.

## **PREMIER CHAPITRE : LA PROBLÉMATIQUE**

### **1. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION EN SCIENCES**

Depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle, les modèles et la modélisation ont fait l'objet de nombreuses réflexions dans le domaine de la philosophie des sciences. Sans vouloir dresser ici une liste exhaustive des philosophes de ce domaine, on peut souligner les travaux fondamentaux de Bachelard (1979), de Black (1954, 1962), de Bunge (1967, 1973), de D'Espagnat, (1983), de Giere (1988, 1992, 1999), d'Harré (1978, 1960, 1970, 1978, 1985), d'Hempel (1965), d'Hesse (1953, 1961, 1963), de Leatherdale (1974), de Walliser (1977), de Wartofsky (1966, 1968, 1979), et plus récemment ceux de Machamer (2000) et de Bailer-Jones (2002).

Sur la base de ces travaux, plusieurs chercheurs qui s'intéressent à l'éducation scientifique ont évoqué la place centrale qu'occupent les modèles et la modélisation en sciences, plus particulièrement en physique. En effet, le fonctionnement de la production du savoir en physique se fait par la modélisation (Bachelard, 1979 ; Tiberghien, Psillos et Koumaras, 1995). C'est dans ce fonctionnement que les éléments du savoir, aussi bien les concepts théoriques qui relèvent du monde des théories et des modèles que les faits expérimentaux qui relèvent du monde des objets et des événements prennent sens (Tiberghien, Malkoun, Buty, El Sowayssi et Mortimer, 2007a). Plusieurs chercheurs s'accordent à dire que la modélisation est l'essence même des processus dynamiques et non linéaires impliqués dans le développement des savoirs scientifiques et adoptent une vision de la science basée sur les modèles et la modélisation pour la construction des théories scientifiques (« modelbased views of scientific theory ») (Bailer-Jones, 1999, 2002 ; Giere, 1988, 1999 ; Grandy, 2003 ; Hestenes, 1992). En d'autres mots, le développement des savoirs dans l'activité scientifique est souvent accompagné de la construction et de la mise à l'épreuve des modèles (Oh et Oh, 2012). Dans cette conception, « les modèles sont considérés comme des sous-ensembles des théories scientifiques - des systèmes d'explications plus complets - qui sont créés avec diverses ressources sémiotiques et qui fournissent des informations sémantiquement riches

pour le raisonnement scientifique et la résolution de problèmes »<sup>2</sup> (Oh et Oh, 2012, p. 1110). Pour Sanmarti (2002, p. 45), « le cœur d'une théorie scientifique n'est pas constitué d'un ensemble d'axiomes ou de lois, mais d'un ensemble de modèles »<sup>3</sup>. En décrivant la physique du physicien, Halbwachs (1975, p. 20) évoque d'ailleurs que : « La théorie physique apparaît ainsi comme constituée de modèles emboîtés » et qu'« après décantation des conflits et des contradictions qui accompagnent les “révolutions scientifiques”, l'histoire de la physique parcourt la succession des modèles emboîtés, décrivant des théories de plus en plus puissantes qui englobent un nombre de plus en plus grand de situations et de domaines. ». Dans le même sens, White et Frederiksen (1998) avancent que les théories complexes en sciences sont développées par un processus d'élaborations et de raffinements successifs dans lequel les modèles scientifiques sont créés et modifiés pour tenir compte des nouveaux phénomènes découverts dans un domaine de connaissance. L'histoire des sciences témoigne d'ailleurs de la place des processus de modélisation dans le développement de nombreuses théories scientifiques (Halloun, 2004). Dans leur discussion des « sept idées qui ont secoué l'univers » de l'astronomie copernicienne à la théorie quantique, Spielberg et Anderson (1995, p. 302-304) affirment que ce sont les modèles qui ont permis des ruptures majeures dans l'histoire de la physique en donnant la possibilité aux humains de synthétiser dans leur esprit des aspects majeurs de la réalité physique qui n'auraient jamais pu être dévoilés autrement.

Les travaux de l'histoire des sciences modernes, comme ceux de Newton ou de Maxwell ainsi que les travaux menés actuellement au sein de nombreuses disciplines scientifiques révèlent d'ailleurs que « la modélisation est l'une des formes majeures de raisonnement scientifique sinon la forme majeure de raisonnement par laquelle les scientifiques génèrent, testent et réifient des idées créatrices et viables sur les réalités physiques grâce au raffinement successif des modèles génériques »<sup>4</sup> (Halloun, 2004, p. 28).

---

<sup>2</sup> Traduction libre : « models are considered subsets of scientific theories—more comprehensive systems of explanations—which are created with various semiotic resources and provide semantically rich information for scientific reasoning and problem solving » (Oh et Oh, 2012, p. 1110).

<sup>3</sup> Traduction libre : « the core of scientific theory is not constituted by a set of axioms or laws but by a set of models » (Sanmarti, 2002, p. 45).

<sup>4</sup> Traduction libre : « modeling is a major form of scientific reasoning – if not “the” major form – whereby scientists generate, test and reify creative and viable ideas about physical realities through the successive refinement of generic models » (Halloun, 2004, p. 28).

Considérant que les modèles figurent parmi les principales composantes de la physique, ils méritent d'être aussi considérés en éducation. C'est pourquoi plusieurs chercheurs dans le champ de la didactique des sciences mettent en exergue la nécessité d'engager les élèves dans l'apprentissage des modèles et de la modélisation à l'école obligatoire.

## **2. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION DANS L'ÉDUCATION SCIENTIFIQUE**

Au cours de deux dernières décennies, les plans d'études de sciences dans les différents systèmes éducatifs à travers le monde ont connu des réaménagements importants dans leurs finalités, contenus et modalités d'enseignement-apprentissage, notamment en accordant une place plus importante aux démarches à caractère scientifique, et plus particulièrement à des approches de modélisation (« student-centred modelling approach »)<sup>5</sup> visant à engager les élèves dans la construction de modèles pour l'étude de divers phénomènes (Portides, 2007).

En raison des fonctions importantes des modèles pour la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes, les modèles sont considérés par plusieurs chercheurs comme étant des composantes essentielles des apprentissages scientifiques à l'école obligatoire (ex. : Coll, France et Taylor, 2005 ; Harrison, 2001 ; Hasni, 2010 ; Hestenes, 1997 ; Johsua et Dupin, 1993, 1989 ; Koponen, 2007 ; Martinand, 1992, 1994 ; Matthews, 2007 ; Orange, 1994, 1997 ; Robardet et Guillaud, 1997). Dans le champ de la physique, Tiberghien et ses collègues (Buty, Tiberghien et Le Maréchal, 2004 ; Gaidioz, Vince et Tiberghien, 2004 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Malkoun, 2007 ; Malkoun, Vince et Tiberghien, 2007 ; Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien, 1994) signalent que si la modélisation constitue le fonctionnement essentiel de la physique savante, alors une certaine forme de modélisation devrait aussi être essentielle dans la physique enseignée.

Les justifications de recourir à un enseignement des modèles et de la modélisation en classe de sciences sont nombreuses et diversifiées. Parmi celles-ci figure au premier rang la compréhension des phénomènes naturels complexes (Acher, Arcà, et Sanmartí, 2007 ; Clement,

---

<sup>5</sup> Plusieurs approches de la modélisation seront exposées dans le cadre conceptuel.

1989 ; Crawford et Cullin, 2004 ; Gobert et Clement, 1999 ; Khan, 2007 ; Izquierdo-Aymerich et Adúriz-Bravo, 2003 ; Koponen, 2007 ; Oh et Oh, 2012 ; Penner, 2001 ; Weil-Barais et Lemeignan, 1990 ; Windschitl et Thompson, 2006). C'est pourquoi plusieurs chercheurs plaident en faveur d'approches au sein desquelles les élèves sont en mesure de prendre en charge, en grande partie, les processus de modélisation. Ces approches partagent souvent certaines phases communes comme l'exploration, l'expression, la construction, l'application et la révision des modèles. En mettant à contribution les modèles par leurs fonctions épistémique (chercher à comprendre) et heuristique<sup>6</sup> (explorer afin de comprendre), ces approches permettent aux élèves d'explorer les phénomènes dans une dynamique itérative par la re-construction des modèles à la lumière des résultats obtenus.

Le recours à des approches basées sur la modélisation pour l'enseignement des sciences favorise la mise en relation entre des éléments de savoir, ce qui permet un enseignement cohérent et intégré de ce domaine. À ce sujet, Robardet et Guillaud (1997) soulignent que dans une démarche de modélisation, les élèves sont appelés à mettre en relation des concepts en vue de la construction de modèles permettant de rendre intelligible les phénomènes à l'étude. Dans la construction du modèle du mouvement rectiligne uniforme en physique, les élèves peuvent être appelés à construire les concepts de position, de vitesse et d'accélération à travers l'étude du mouvement d'objets matériels dont la grandeur et l'orientation de la vitesse sont constantes en tout temps (ex. : mouvement d'une rondelle projetée sur une table à coussin d'air), et à mettre en relation ces concepts afin de construire des équations mathématiques associées à ce phénomène telles que la relation entre la vitesse, l'accélération le temps (  $v_x(t) = v_{x0} + a_x t$  )<sup>7</sup>, la relation entre la position, la vitesse, l'accélération et le temps (  $x(t) = x_0 + v_{x0}t + \frac{1}{2}a_x t^2$  ) ou encore la relation entre la vitesse, l'accélération et la position (  $v_x(x)^2 = v_{x0}^2 + 2a_x(x - x_0)$  ). Par ailleurs, l'idée d'intégration dépasse

---

<sup>6</sup> Les travaux de la psychologie cognitive de Johnson-Laird (1983) mettent en évidence la fonction heuristique des modèles en soulignant que ceux-ci sont de précieux outils pour penser et comprendre divers phénomènes physiques. Il décrit la connaissance comme la capacité de l'humain à se construire un modèle mental de la réalité que l'on cherche à connaître : « Toute notre connaissance du monde dépend de notre capacité à construire un modèle de celui-ci » (p. 402).

<sup>7</sup> Définition des variables :  $V_x$  : vitesse sur l'axe horizontal ;  $V_{x0}$  : vitesse initiale sur l'axe horizontal,  $a_x$  : accélération sur l'axe horizontal ;  $t$  : temps.

largement celle de la mise en relation entre des savoirs au sein d'une même discipline (intradisciplinarité). En référant aux propos d'Hestenes (2007, 2010), qui dit que tout modèle permet de représenter un phénomène physique selon une double structure (une structure physique, qui se réfère à une intuition physique et relevant des objets et des événements du monde réel ; une structure mathématique, qui se réfère à une intuition mathématique et relevant des représentations symboliques), l'enseignement de la physique basé sur la modélisation met nécessairement en jeu une interdisciplinarité (Lenoir et Sauvé, 1998)<sup>8</sup> forte entre les savoirs de la physique et les savoirs de mathématiques.

D'autres auteurs pointent l'acquisition et la mobilisation de savoirs conceptuels comme justification centrale du recours à un enseignement des modèles et de la modélisation en classe de sciences (Chomat, Larcher et Méheut, 1992 ; Coll *et al.*, 2005 ; Coquidé et Le Maréchal, 2006 ; Halloun, 2007 ; Justi et Gilbert, 2002a, 2002b, 2003 ; Megalakaki et Tiberghien, 2011 ; Schwarz et White, 2005). En effet, Coquidé et Le Maréchal (2006) soutiennent que le principal objectif pédagogique d'un enseignement basé sur la modélisation est que les élèves construisent des savoirs conceptuels en modélisant des phénomènes scientifiques. En référant aux finalités éducatives de l'enseignement des sciences proposées par Hodson (1992, 1993), Justi et Gilbert (2002a, 2002b, 2003) soulignent que l'engagement des élèves dans une réflexion épistémologique sur la portée et les limites des modèles s'accompagne souvent d'une appropriation de savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, etc.). Quant    Megalakaki et Tiberghien (2011) ou Schwarz et White (2005), ils convoquent les travaux de la psychologie cognitive (ex. : Clement et Rea-Ramirez, 2008 ; Johnson-Laird, 1983 ; Jonassen, 2004) ; Nersessian, 1999, 2000) pour expliquer, du point de vue du changement conceptuel, la construction des savoirs conceptuels au cours des processus de modélisation. Ces auteurs appréhendent la modélisation en physique en tant qu'approche de changement conceptuel de premier choix pour amener les élèves à visualiser, valider, modifier et élaborer leurs théories personnelles qu'ils construisent sur la réalité empirique<sup>9</sup>. Sur le plan

---

<sup>8</sup> Nous considérons ici l'interdisciplinarité au sens strict qui consiste en la « mise en relation de deux ou de plusieurs disciplines scolaires (...) et qui conduit à l'établissement de liens de complémentarité ou de coopération, d'interpénétrations ou d'actions réciproques entre elles sous divers aspect (finalités, objets d'études, concepts et notions, démarches d'apprentissage, habilités techniques, etc.), en vue de favoriser l'intégration des processus d'apprentissage et des savoirs chez les élèves » (Lenoir et Sauvé, 1998, p. 121).

<sup>9</sup> Dans une perspective psychologique de l'apprentissage, il y a changement conceptuel si un élève passe d'un modèle mental initial partiel à un modèle intermédiaire plus rapproché d'un modèle scientifique ou historiquement établi (Duit



empirique, l'acquisition et la mobilisation des savoirs conceptuels au sein des approches de modélisation sont également démontrées. Dans son étude menée auprès d'élèves du secondaire dans le domaine de la physique mécanique, Halloun (2007) a comparé la compréhension qualitative de concepts entre des groupes d'élèves ayant suivi une approche de modélisation constructiviste (qu'il a lui-même développée) et d'autres ayant bénéficié d'un enseignement conventionnel de la modélisation mettant l'accent sur la transmission des modèles par des exposés magistraux et des démonstrations<sup>10</sup>. L'analyse de l'évolution des conceptions mesurées à partir d'une épreuve portant sur les connaissances conceptuelles de base en physique mécanique (« The Inventories of Basic Conceptions »)<sup>11</sup> a montré que si des élèves sont engagés dans une approche de modélisation constructiviste, ils ont une compréhension qualitative des savoirs significativement plus élevée que des élèves engagés dans un enseignement conventionnel de la modélisation<sup>12</sup>. Au terme de son étude, Halloun (2007) conclut sur l'importance d'aller au-delà d'un enseignement transmissif des modèles afin de favoriser l'élaboration conceptuelle, notamment celle en lien avec l'acquisition des principaux modèles historiques.

L'acquisition et la mobilisation de savoirs conceptuels se font en concomitance avec celle des savoirs procéduraux. Justi et Gilbert (2002a, 2002b, 2003), en s'appuyant sur l'une des finalités de l'enseignement des sciences proposées par Hodson (1992, 1993) qui consiste à « apprendre à faire de la science » (« learning to do science »), mettent en exergue l'importance d'engager les élèves dans des activités de modélisation leur permettant de créer, exprimer et tester leurs propres modèles. Les descriptions des approches de modélisation faites par plusieurs auteurs mettent en

---

et Glynn, 1996). Les travaux de Johnson-Laird (1983) stipulent que tous les actes de compréhension impliquent la formation et l'utilisation de modèles mentaux : les activités d'apprentissage des modèles scientifiques existants (« model learning »), de révision des modèles (« model revision ») ou de production de nouveaux modèles (« model production ») impliquent toutes la modélisation mentale (« mental modelling »). Nersessian (1999, 2002), en s'inscrivant dans une perspective cognitive de la pratique scientifique, avance que le raisonnement basé sur les modèles et la modélisation (« model-based reasoning ») implique la construction et la modification des modèles. Dans le même sens, Clement et Rea-Ramirez (2008) décrivent l'investigation scientifique comme une construction et une révision progressives d'un modèle et proposent un processus cyclique itératif pour l'apprentissage des modèles par les élèves.

<sup>10</sup> Dans le cadre conceptuel, nous distinguerons entre des approches ou démarches de modélisation s'inscrivant dans des logiques transmissives et constructivistes.

<sup>11</sup> Cette épreuve a été développée par Halloun qui s'est appuyé sur deux tests standardisés : le « Mechanics Diagnostic Test » (Halloun, 1984 ; Halloun et Hestenes, 1985b) et le « Force Concept Inventory » (Hestenes, Wells et Swackhamer, 1992).

<sup>12</sup> Les élèves du premier groupe auraient obtenu sur les post-tests un score jusqu'à deux écarts-types en moyenne supérieurs à ceux des élèves du deuxième groupe.

évidence la place centrale des savoirs procéduraux (démarches, habiletés intellectuelles ou manuelles, etc.) dans les apprentissages scientifiques (Gilbert, 2004 ; Halloun, 2004 ; Hestenes, 1987, 1992, 1996 ; Khan, 2007 ; Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009). En effet, Halloun (2004)<sup>13</sup>, en s'inspirant du cycle d'apprentissage de Karplus (1977), conceptualise le processus de modélisation par un cycle d'apprentissage composé de cinq phases consécutives : l'exploration du modèle, l'adduction du modèle, la formulation du modèle, le déploiement du modèle et la synthèse paradigmatique. Gilbert (2004) suggère d'inscrire dans les nouveaux plans d'études de sciences des orientations plus explicites sur les processus de modélisation dans une perspective progressive à travers une séquence en 4 étapes : « Apprendre à utiliser des modèles », « Apprendre à réviser des modèles », « Apprendre à reconstruire un modèle » et « Apprendre à construire un nouveau modèle »<sup>14</sup> (p. 120-122). De manière à développer des connaissances sur les pratiques de la modélisation (« knowledge of scientific modeling practices »), Schwarz et White (Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009) proposent d'engager les élèves dans l'approche didactique *Engage-Investigate-Model-Apply* (EIMA) qu'ils ont développée dans le contexte des récentes réformes scolaires en enseignement des sciences, et pour laquelle les élèves sont appelés à concevoir, exprimer, comparer, évaluer, tester et réviser des modèles. Enfin pour Hestenes (1992, p. 732), « le grand jeu de la science est la modélisation du monde réel, et chaque théorie scientifique établit un système de règles pour jouer le jeu. L'objectif de ce jeu est de construire des modèles valides des objets et des processus de la réalité. Ces modèles constituent le noyau de contenu du savoir scientifique. Comprendre la science, c'est savoir comment les modèles scientifiques sont construits et validés. Le principal objectif de l'enseignement des sciences doit donc être d'enseigner le jeu de modélisation »<sup>15</sup>. Plus précisément, Hestenes (1996, p. 7) affirme que « le principal objectif de l'enseignement de la physique devrait être de développer les compétences de modélisation des élèves afin qu'ils puissent donner un sens à leur propre

---

<sup>13</sup> Nous développerons l'approche cyclique de modélisation d'Halloun dans le cadre conceptuel.

<sup>14</sup> Traduction libre : « Learning to Use of Models », « Learning to Revise Models », « Learning the Reconstruction of a Model », « Learning to Construct Models de novo » (Gilbert, 2004, p. 120-122).

<sup>15</sup> Traduction libre : « The great game of science is modeling the real world, and each scientific theory lays down a system of rules for playing the game. The object of the game is to construct valid models of real objects and processes. Such models comprise the content core of scientific knowledge. To understand science is to know how scientific models are constructed and validated. The main objective of science instruction should therefore be to teach the modeling game » (Hestenes, 1992, p. 732).

expérience physique et être en mesure d'évaluer les informations rapportées par leurs pairs »<sup>16</sup>, et ce, sachant que « la compréhension physique est un ensemble complexe de compétences de modélisation, c'est-à-dire de compétences cognitives pour concevoir et utiliser des modèles »<sup>17</sup> (*Ibid.*, p. 7). C'est pourquoi Hestenes (1987, 1992) développe à la fin des années 1980 la *Modeling Method of instruction*<sup>18</sup> qui consiste en une approche didactique de l'enseignement de la physique basée sur la modélisation dans le champ de la mécanique newtonienne, et dont le domaine de validité sera ultérieurement étendu à l'électricité. Dans le développement de son approche, Hestenes (1987) insiste sur le fait que celle-ci interpelle non seulement des savoirs conceptuels comme les concepts, les modèles, les lois, etc., mais aussi des savoirs procéduraux comme les tactiques, les stratégies, les techniques, etc., car ce sont ces objets de savoir qui permettent la mobilisation et l'acquisition de savoirs conceptuels.

L'acquisition de savoirs épistémologiques figure également parmi les principales justifications de l'enseignement de modèles et de la modélisation (Coll *et al.*, 2005 ; Justi et Gilbert, 2002a, 2002b, 2003 ; Schwartz et Lederman, 2005 ; Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009). Justi et Gilbert (2002a, 2002b, 2003), en s'appuyant sur l'une des trois finalités de l'enseignement des sciences proposées par Hodson (1992, 1993), militent en faveur d'un apprentissage à propos de la science (« learning about science »). Cette référence épistémologique aux savoirs témoigne chez Schwarz et ses collègues (Schwartz et Lederman, 2005 ; Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009) de l'idée de développer chez les élèves des « connaissances sur la métamodélisation » (« metamodeling knowledge »). Ces connaissances portent sur la manière dont les savoirs scientifiques sont construits et sur des questions importantes qui relèvent de la philosophie et de l'histoire des sciences. Sous l'angle des modèles, elles concernent la nature des modèles (caractéristiques, fonctions, diversité, portée, limites, etc.) et des processus de modélisation (utilisation, validation, révision et construction des modèles) pris en charge par les scientifiques. Coll *et al.* (2005) évoquent que les élèves, et aussi le public en général, ont une compréhension

---

<sup>16</sup> Traduction libre : « The primary objective of physics teaching should therefore be to develop student modeling skills for making sense of their own physical experience and evaluating information reported by others. » (Hestenes, 1996, p. 7)

<sup>17</sup> Traduction libre : « physical understanding is a complex set of modeling skills, that is, cognitive skills for making and using models. » (Hestenes, 1996, p. 7)

<sup>18</sup> Nous développerons l'approche cyclique de modélisation d'Hestenes dans le cadre conceptuel.

limitée de la nature des sciences, et plus particulièrement de la manière avec laquelle les scientifiques utilisent les modèles pour représenter, expliquer et prédire des phénomènes microscopiques et macroscopiques du monde naturel. De ce fait, ces auteurs s'accordent à dire avec d'autres (ex. : Gilbert, 1991 ; Harrison et Treagust, 2000 ; Hestenes, 1992) que comprendre les sciences, c'est comprendre comment les modèles scientifiques sont construits, validés et utilisés par les scientifiques. En définissant la science comme un processus de construction des modèles, cela aide les élèves à comprendre que tout savoir scientifique est une construction humaine et sociale et que les modèles varient dans leur capacité à se rapprocher, expliquer et prédire des phénomènes, mais sans pourtant s'y confondre (Gilbert, 1991). Ainsi, l'acquisition d'une compréhension du rôle des modèles en sciences contribuerait à une éducation scientifique « authentique » dans laquelle la discipline scolaire s'apparenterait le plus possible à la discipline de référence (chimie, physique, etc.) (Gilbert *et al.*, 2000). Sur le plan empirique, plusieurs travaux ont mis en évidence que les approches de modélisation centrées sur le développement de compétences épistémologiques favorisent non seulement la construction d'une meilleure représentation de l'activité scientifique, mais également l'appropriation des savoirs conceptuels chez les élèves (Driver, Leach, Millar et Scott, 1996 ; Gobert, 2003 ; Gobert et Discenna, 1997 ; Gobert *et al.*, 2011 ; Gobert et Clement, 1999 ; Gobert et Pallant, 2004 ; Lederman, 1992, 2006 ; Lehrer et Schauble, 2006 ; Lesh et Doerr, 2000 ; Rotbain, Marbach-Ad et Stavy, 2006 ; Schwarz, 2002 ; Schwarz et White, 1999 ; Smith, Maclin, Houghton et Hennessey, 2000 ; Stewart, Cartier et Passmore, 2005 ; Treagust, Chittleborough et Mamiala, 2002 ; Wilensky et Reisman, 2006). En effet, lors des activités de modélisation, Gobert et Discenna (1997) et Schwarz et White (1999) ont montré que le degré de pertinence des modèles construits par les élèves pour appréhender les phénomènes à l'étude était positivement corrélé à leur compréhension de la nature des modèles. Ces constats ont amené Danusso, Testa et Vicentini (2010, p. 872) à dire que les enseignants devraient avoir non seulement une bonne connaissance des modèles utilisés dans la communauté scientifique, mais aussi une bonne compréhension de la nature des modèles en sciences : « En d'autres termes, les enseignants devraient être conscients du rôle des modèles dans le processus de construction des savoirs scientifiques et de la modélisation comme support essentiel à la

compréhension conceptuelle des concepts scientifiques. »<sup>19</sup>. Dans l'autre sens, l'engagement des élèves dans les processus de modélisation leur permet de se construire une meilleure représentation de la nature des modèles, et plus globalement de la nature des sciences (Coll *et al.*, 2005 ; Hestenes, 1987 ; Megalakaki et Tiberghien, 2011). Ces affirmations s'inscrivent en cohérence avec les finalités éducatives associées à la modélisation proposée par Hestenes (1987, 1992) qui souligne qu'étant donné que le modèle est une représentation conceptuelle d'un système réel qui obéit aux lois de la physique, construire des modèles aide les élèves à se concentrer sur la reconstruction conceptuelle de la réalité et à se construire ainsi une vision plus cohérente des sciences.

Enfin, plusieurs chercheurs justifient le recours à un enseignement des modèles et de la modélisation en classe de sciences du fait qu'il favorise la communication des idées et des connaissances par le passage d'un modèle mental à un modèle matérialisé (Buckley et Boulter, 2000 ; Clement, 1989 ; Duit, 1991 ; Gilbert *et al.*, 2000 ; Harrison et Treagust, 2000 ; Justi et Gilbert, 2000 ; Koponen, 2007 ; Nersessian, 1999 ; Penner, 2001 ; Schwarz et White, 2005). Si les références aux philosophes fondamentalistes Bunge (1983), Popper (2002/1935), Kuhn (1962) et Lakatos et Musgrave (1970) sont fréquemment invoquées par des chercheurs qui proposent des approches d'enseignement de la modélisation, les aspects social et sociologique de l'utilisation des modèles pour communiquer et exprimer des connaissances et des idées sont également mis en évidence par plusieurs d'entre eux. En s'engageant dans des activités de conception, de validation, de révision et d'utilisation de modèles externes (« external models »), appelés aussi modèles exprimés (« expressed models »)<sup>20</sup>, les élèves peuvent exprimer leurs propres modèles mentaux (« mental models ») (France, 2000 ; Mellar, Bliss, Boohan, Ogborn et Tompsett, 1994 ; Nersessian, 1999 ; White et Frederiksen, 1990 ; Zimmermann, 2000). Ainsi, la modélisation peut aider les élèves non seulement à extérioriser leur pensée, mais aussi à visualiser et tester les composantes de leurs idées conceptuelles, ce qui peut les aider à faire progresser leur réflexion et à développer leur compréhension du monde matériel (Schwarz et White, 2005). De ce fait, les

---

<sup>19</sup> Traduction libre : « In other words, teachers should be aware of the role of models in the process of constructing the scientific body of knowledge and modelling as a key support to conceptual understanding of scientific concepts. » (Danusso, Testa et Vincenti, 2010, p. 872)

<sup>20</sup> À l'instar de Nersessian (1999), nous pensons toutefois que les modèles externes produits par les élèves ne recouvrent pas nécessairement les modèles mentaux. Ces derniers ne sont pas communicables en totalité et une part d'implicite subsiste nécessairement.

modèles externes peuvent consister en de véritables modèles pour l'enseignement (« teaching models ») (Coll *et al.*, 2005) et contribuer au développement des modèles mentaux des élèves comme l'évoque Nersessian (1999, p. 17).

Ils [les modèles externes] aident de manière significative à organiser l'activité cognitive au cours du raisonnement, en fixant l'attention sur les aspects pertinents d'un modèle, en permettant la récupération et le stockage des informations pertinentes et en présentant des interconnexions structurelles et causales pertinentes. Par ailleurs, ces représentations visuelles externes [...] facilitent la construction de modèles mentaux partagés dans une communauté.<sup>21</sup>

En s'appuyant sur les travaux de Nersessian (1999), Buckley et Boulter (2000) expliquent que les modèles externes construits par les élèves leur permettent d'exprimer leurs conceptions et peuvent constituer des supports au débat scientifique dans la classe, débat dont les interactions favorisent l'apprentissage. Penner (2001) soutient l'importance d'engager les élèves dans la conception de modèles physiques explicatifs (« physical model-explanatory ») pouvant faire l'objet d'une médiatisation sociale en classe. Cet auteur stipule que pour aider les élèves à améliorer leur compréhension du monde naturel, il est nécessaire de les engager dans la conception de ce type particulier de modèle, car il leur permet de s'exprimer et de débattre sur leur compréhension des phénomènes. Des expérimentations conduites pour l'enseignement des sciences physiques ont amené Johsua et Dupin (1989) à organiser des activités de débat scientifique dans la classe de manière à ce que les conceptions des élèves constituent de véritables débuts de modélisation et à ce que ces débats soient organisés pour confronter les modèles élaborés par les élèves. Ainsi, en faisant place au débat scientifique dans les activités de modélisation, la classe peut se transformer en une véritable communauté discursive scientifique mettant en jeu des processus de négociation comparables à ceux qui fonctionnent dans la communauté des savants (Johsua et Dupin, 1993 ; Lhoste, 2008 ; Orange, 2003). Ce faisant, les élèves peuvent être placés dans une situation similaire à celle de l'activité scientifique qui consiste à argumenter, débattre, développer des raisonnements et élaborer sa pensée afin de produire des savoirs (Chevallard, 1991 ; Driver, Newton, Osborne

---

<sup>21</sup> Traduction libre : « They [externally presented models] aid significantly in organizing cognitive activity during reasoning, such as fixing the attention of the salient aspects of a model during reasoning, enabling retrieval and storage of salient information and exhibiting salient interconnections, such as structural and causal, in appropriate co-location. Further external visual representations ... facilitate the construction of shared mental models in a community. » (Nersessian, 1999, p. 17)

*et al*, 2000 ; Ogan-Bekiroglu et Belek, 2014 ; Orange, 1997, 2003 ; Osborne, Erduran, Simon et Monk, 2001 ; Schneeberger, Robisson, Liger-Martin et Darley, 2007).

Considérant l'importance que les chercheurs accordent aux modèles et à la modélisation en sciences, plusieurs systèmes éducatifs à travers le monde ont affirmé la nécessité d'engager les élèves dans l'apprentissage de ces objets d'étude à l'école obligatoire. C'est particulièrement le cas dans le nouveau programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire au Québec.

### **3. LES MODÈLES ET LA MODÉLISATION COMME COMPOSANTES FONDAMENTALES DU PROGRAMME QUÉBÉCOIS DE PHYSIQUE DE 5<sup>E</sup> SECONDAIRE**

Contrairement à l'ancien programme de physique 534 par objectifs *À la découverte de la matière et de l'énergie* (Gouvernement du Québec, 1992), le récent programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire<sup>22</sup> (Gouvernement du Québec, 2009) est structuré autour de trois compétences disciplinaires<sup>23</sup> fonctionnant en symbiose et permettant la construction de concepts prescrits associés aux quatre grands domaines (la cinématique, la dynamique, la transformation de l'énergie et l'optique géométrique) du programme. C'est plus particulièrement par le biais de la première compétence d'ordre méthodologique *Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique* que la modélisation est interpellée (**figure 1**). En effet, le fait de chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique implique le recours à divers modes de raisonnement ainsi qu'à certaines démarches à caractère scientifique dont la démarche de modélisation<sup>24</sup> et au sein de laquelle les élèves sont appelés à construire des modèles : « La

---

<sup>22</sup> Le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui « s'inscrit dans le prolongement des programmes du premier et du deuxième cycle du secondaire vise à consolider et à enrichir la formation scientifique des élèves et constitue un préalable permettant d'accéder à plusieurs programmes préuniversitaires ou techniques offerts par les établissements d'enseignement collégial. Il se distingue par son contenu monodisciplinaire dont les concepts prescrits sont regroupés autour des concepts généraux suivants : la cinématique, la dynamique, la transformation de l'énergie et l'optique géométrique. » (Gouvernement du Québec, 2009).

<sup>23</sup> Il s'agit des compétences « Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique », « Mettre à profit ses connaissances en physique » et « Communiquer sur des questions de physique à l'aide des langages utilisés en science et technologie ».

<sup>24</sup> La démarche de modélisation est spécifiée explicitement dans les programmes de science et technologie du deuxième cycle du secondaire (Gouvernement du Québec, 2007, 2009). En effet, au deuxième cycle « s'ajoutent de manière plus explicite la démarche d'observation, la démarche de modélisation et la démarche empirique » aux démarches d'investigation scientifique (*Ibid.*, 2007, 2009, p. 12).

démarche de modélisation consiste à construire une représentation destinée à concrétiser une situation abstraite, difficilement accessible ou carrément invisible » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 24). Au cours de cette démarche, l'élaboration du modèle ne se fait pas de façon linéaire, mais plutôt selon un processus cyclique : « Au fur et à mesure que la démarche progresse, le modèle se raffine et se complexifie. Il peut être valide pendant un certain temps et dans un contexte spécifique. Mais, dans plusieurs cas, il est appelé à être modifié ou rejeté. » (*Ibid.*, p. 24). Pour le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS), un modèle « peut prendre diverses formes : texte, dessin, formule mathématique, équation chimique, programme informatique ou maquette » (*Ibid.*, p. 24). Par ailleurs, certaines fonctions des modèles y sont rapportées comme les fonctions de représentation, d'explication et de prédiction : « Il importe également de considérer le contexte dans lequel il a été construit. Il doit faciliter la compréhension de la réalité, expliquer certaines propriétés de ce qu'il vise à représenter et permettre la prédiction de nouveaux phénomènes observables. » (*Ibid.* p. 24).

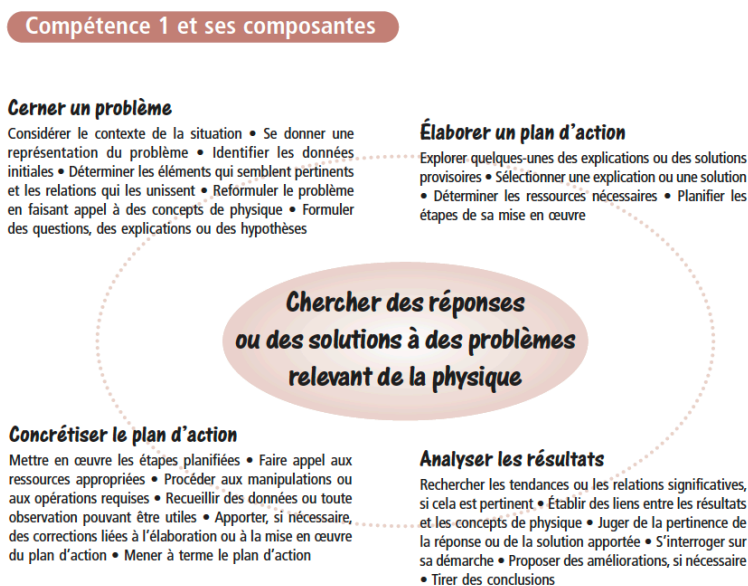


Figure 1- La compétence « Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 3)

Si les modèles et la modélisation font partie des composantes fondamentales d'enseignement et d'apprentissage des programmes de science et technologie dès le premier cycle du secondaire (élèves âgés de 12 à 14 ans), le mode de description des phénomènes n'est pas le même au deuxième cycle du secondaire (élèves âgés de 15 à 17 ans) (Gouvernement du Québec, 2004, 2007b, 2009). Au premier cycle, la description qualitative des phénomènes est privilégiée alors



qu'au deuxième cycle, les modèles ont pour fonction de décrire qualitativement et quantitativement les phénomènes. Dès lors, la modélisation mathématique occupe une place centrale dans l'étude des phénomènes physiques à ce degré d'enseignement.

Sous l'angle de la physique, la compréhension d'un phénomène ou d'une application exige de reconnaître des principes qui se rapportent à cette discipline. Cette reconnaissance consiste en une description qualitative **et souvent quantitative de ces principes qui mènera généralement à l'exploration et à la construction des divers concepts, lois ou modèles** qui les sous-tendent. (*Ibid.*, 2009, p. 16).

Dans le domaine de la cinématique, les élèves sont appelés à modéliser, à l'aide des langages formalisés en mathématiques (graphiques, formules ou équations mathématiques), le mouvement rectiligne uniformément accéléré d'un corps, en décrivant des relations entre l'accélération, la variation de la vitesse, la distance parcourue et le temps (*Ibid.*, 2009, p. 39). Par ailleurs, dans une perspective de formation intégrée, les apprentissages réalisés en physique ne doivent pas être dissociés de ceux effectués dans d'autres disciplines, plus particulièrement les mathématiques, qui offrent les fondements nécessaires à la conception et la construction des modèles par les outils conceptuels qu'elles proposent.

**La mathématique est souvent d'une grande utilité dans l'élaboration ou la construction de modèles** visant à rendre compte des relations qui existent entre certaines variables déterminantes. Elle est aussi utilisée dans la résolution de problèmes, tant sur le plan expérimental que sur le plan théorique. De plus, le vocabulaire, le graphisme, la notation et les symboles auxquels elle recourt constituent un langage rigoureux dont tire profit la science. (*Ibid.*, 2009, p. 6).

Si les modèles et la modélisation figurent au rang des composantes fondamentales d'enseignement et d'apprentissage du récent programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, leur enseignement peut poser des défis particuliers en raison du peu de clarifications sur les fondements didactiques qui les sous-tendent. Le nouveau programme se distingue nettement de son prédécesseur, le programme de physique 534 par objectifs, quant à l'absence de définition opérationnelle du processus de modélisation et à la nette dissociation de la démarche de modélisation avec les concepts prescrits à faire apprendre aux élèves. En effet, les orientations et les concepts prescrits associés au domaine de la cinématique sont présentés sous la forme d'une liste non limitative comme le présente la **figure 2**. Dans la colonne de droite de cette figure, c'est

l'idée d'aborder la cinématique essentiellement à travers quatre grandes thématiques (appelées concepts prescrits par les MELS) qui est mise en évidence : le système de référence, le mouvement rectiligne uniforme, le mouvement rectiligne uniformément accéléré et le mouvement des projectiles qui combine à la fois les deux types de mouvement précédents. Dans ce nouveau programme, les enseignants doivent s'appuyer sur des orientations (colonne de gauche du tableau) assez générales et formulées en termes de relations entre des savoirs disciplinaires, afin de dégager les tâches que les élèves pourraient faire pour modéliser des phénomènes de la cinématique. Par ailleurs, le programme propose des pistes de contextualisation pour les concepts prescrits du domaine de la cinématique et des liens avec les concepts abordés antérieurement en précisant qu'il revient à l'enseignant de choisir les pistes les plus prometteuses pour les apprentissages des élèves : « Proposées à titre indicatif afin de soutenir l'intervention pédagogique, elles offrent la possibilité d'intégrer des connaissances scientifiques, technologiques et mathématiques. D'autres contextes peuvent également être porteurs de sens et il revient aux enseignants de privilégier ceux qui sont les plus susceptibles de servir les intérêts des élèves » (*Ibid.*, 2009, p. 30).

Orientations	Concepts prescrits
<p><b>Cinématique</b></p> <p>Partout, autour de nous et en nous, les choses vibrent et bougent les unes par rapport aux autres. Il n'existe pas de système de référence absolu pour décrire le mouvement. Celui-ci est relatif à un système de référence choisi. Le mouvement des objets est en général le résultat d'une combinaison de divers types de mouvements. Le mouvement rectiligne uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré (cas d'un corps sur un plan incliné ou en chute libre) font l'objet d'une étude approfondie faisant intervenir un ensemble de concepts (position, déplacement, distance parcourue, temps, vitesse, variation de vitesse, accélération) qu'il importe de distinguer et de mettre en relation.</p> <p>Les équations et les graphiques (position, vitesse et accélération en fonction du temps) construits à partir de données constituent des modes de représentation incontournables. Ils décrivent tous deux les relations entre des variables et mettent ainsi en évidence les tendances des changements étudiés. Des liens sont établis entre les équations du mouvement et leur représentation graphique. De plus, à partir de l'interprétation d'un seul graphique, les deux autres doivent pouvoir être déduits.</p> <p>Les changements de position, les vitesses et les accélérations sont considérés comme des grandeurs vectorielles et les opérations sur celles-ci doivent être maîtrisées.</p> <p>Les mouvements complexes, comme celui des projectiles, sont décomposés en d'autres mouvements plus simples.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Système de référence</li> <li>– Mouvement rectiligne uniforme <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relation entre la position par rapport à l'origine, la vitesse et le temps</li> <li>• Déplacement et distance parcourue</li> </ul> </li> <li>– Mouvement rectiligne uniformément accéléré <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relation entre l'accélération, la variation de la vitesse et le temps</li> <li>• Relation entre l'accélération, la distance parcourue et le temps</li> <li>• Vitesse moyenne et vitesse instantanée</li> <li>• Mouvement d'un corps sur un plan incliné</li> <li>• Chute libre</li> </ul> </li> <li>– Mouvement des projectiles</li> </ul>

Figure 2- Orientations et concepts prescrits associés au domaine de la cinématique dans le nouveau programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (Gouvernement du Québec, 2009, p. 22)

Cette manière de présenter les modèles et la modélisation dans le nouveau programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire relève probablement d'un choix qui a été fait par le MELS d'accorder une plus grande autonomie professionnelle aux enseignants dans leurs pratiques d'enseignement<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> Les mouvements de professionnalisation des enseignants qui ont eu lieu au cours des cinquante dernières années dans le système scolaire québécois ont entraîné des changements importants sur les orientations des nouveaux programmes de sciences et technologies au secondaire. Dès 2004, le MELS amorça le renouvellement complet des

Pour autant, le risque est grand d'engendrer une grande diversité de manières de concevoir et mettre en œuvre la démarche de modélisation à l'école, notamment chez les nouveaux enseignants qui n'ont jamais pris connaissance du programme de physique des années 1990. Comment, dans ce contexte, les enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire conçoivent-ils et opérationnalisent-ils les modèles et la modélisation dans leur enseignement ?

Situés au cœur du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, les modèles et la modélisation constituent des objets disciplinaires qui structurent en grande partie les pratiques d'enseignement des enseignants de physique. Par le statut qui leur est accordé dans le discours scientifique et dans le discours officiel, ils méritent d'être considérés dans les recherches en éducation.

#### **4. LES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ORDINAIRES DES MODÈLES ET DE LA MODÉLISATION EN CINÉMATIQUE COMME OBJET D'ÉTUDE**

Notre analyse de la documentation scientifique portant sur les modèles et la modélisation dans l'enseignement des sciences a permis de mettre en évidence que la majorité des travaux dans ce domaine s'inscrit essentiellement dans l'une ou l'autre des cinq orientations suivantes : 1) L'étude des conceptions des élèves sur les modèles et la modélisation (ex. : Chittleborough, Treagust, Mamiala et Mocerino, 2005 ; Grosslight, Unger et Jay, 1991 ; Treagust *et al.*, 2002) ; 2) L'évaluation de modes d'intervention visant à changer les conceptions des élèves sur les modèles et la modélisation (ex. : Angell, Kind, Henriksen et Guttersrud, 2008 ; Gobert et Pallant, 2004 ; Schwarz et White, 2005) ; 3) L'étude des conceptions ou des pratiques d'enseignement déclarées des enseignants sur les modèles et la modélisation (ex. : Aktan, 2005 ; Henze, Driel et Verloop, 2007 ; Justi et Gilbert, 2002a, 2002b ; Justi et Gilbert, 2003 ; Roy et Hasni, 2014 ; Smit et Finegold, 1995 ; Van Driel et Verloop, 1999, 2002) ; 4) L'évaluation de dispositifs de formation visant à développer les compétences professionnelles des enseignants à enseigner les modèles et la modélisation (ex. : Cabot, 2008 ; Crawford et Cullin, 2004 ; Danusso *et al.*, 2010) ; 5) L'étude des pratiques d'enseignement observées dans le cadre de recherches collaboratives (ex. : Malkoun, 2007 ; Seck, 2008 ; Tachoua, 2005 ; Tiberghien, Malkoun et Seck, 2008 ; Tiberghien *et al.*, 2007a).

---

programmes d'études de sciences et technologies au secondaire. En 2009, c'était le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui était renouvelé.

Dans les deux sous-sections suivantes, nous nous attardons aux études qui s'intéressent aux conceptions, pratiques d'enseignement déclarées ou observées des enseignants sur les modèles et la modélisation, car ce sont ces angles d'analyse qui sont plus particulièrement concernés dans cette thèse.

#### **4.1 L'étude des conceptions et des pratiques d'enseignement déclarées des modèles et de la modélisation**

Si ces travaux s'inscrivant dans les deux premières orientations font état d'une compréhension partielle des modèles et de la modélisation et de grandes difficultés dans l'apprentissage de ces objets d'étude par les élèves, les travaux s'inscrivant dans la troisième orientation montrent que c'est aussi le cas chez les futurs enseignants et les enseignants. Smit et Finegold (1995) ont étudié les perceptions des modèles en physique chez 196 futurs enseignants de sciences physiques inscrits dans des universités sud-africaines. Plusieurs d'entre eux pensent qu'un modèle doit être très semblable au phénomène que le modélisateur souhaite modéliser et que les principales fonctions des modèles se limitent à la représentation et à l'explication des phénomènes. La fonction euristique (le modèle en tant qu'un outil d'exploration des phénomènes) et la fonction prédictive des modèles ne sont presque jamais évoquées.

Van Driel et Verloop (1999) ont étudié les connaissances pratiques (teacher's practical knowledge)<sup>26</sup> sur les modèles et la modélisation en sciences chez 81 enseignants néerlandais du secondaire de différentes disciplines (biologie, chimie et physique). Leurs résultats montrent que, même si les enseignants partagent une définition assez similaire de la notion de modèle, à savoir qu'« un modèle consiste en une représentation simplifiée ou schématique de la réalité », les critères qu'ils utilisent pour déterminer si des exemples précis peuvent être qualifiés ou non comme des modèles scientifiques sont très différents d'un enseignant à l'autre. Par ailleurs, certaines fonctions des modèles ont été rarement mentionnées par les enseignants, notamment la fonction de prédiction et la fonction euristique, comme c'est le cas dans l'étude de Smit et Finegold (1995).

---

<sup>26</sup> Les connaissances pratiques des enseignants se composent de l'ensemble accumulé et intégré des connaissances et des croyances que les enseignants développent à l'égard de leur pratique d'enseignement (Grimmett et Mackinnon, 1992).

Justi et Gilbert (2003) ont étudié les représentations (teachers' views) de la nature des modèles chez 39 enseignants et futurs enseignants brésiliens de sciences intervenant dans l'enseignement fondamental (élèves âgés de 6 à 14 ans) et secondaire (élèves âgés de 15 à 17 ans), ainsi que dans l'enseignement universitaire. Ils ont montré que si tous les futurs enseignants et les enseignants ont exprimé l'idée qu'« un modèle est une représentation de quelque chose », la majorité d'entre eux, et plus particulièrement ceux qui interviennent au niveau de l'enseignement fondamental, affirment qu'« un modèle est une reproduction de quelque chose ». Pour les 2/3 des enseignants, l'entité que représente le modèle est un objet physique, alors que seulement le 1/3 des enseignants affirme que le modèle peut représenter un évènement, un processus ou une idée scientifique. La moitié d'entre eux considère un modèle en tant qu'« une norme à suivre ». Ces résultats indiquent que les répliques des objets physiques sont considérées comme des modèles scientifiques par les enseignants.

Justi et Gilbert (2002b) se sont intéressés à la manière dont des enseignants et futurs enseignants brésiliens de sciences<sup>27</sup> conçoivent et mettent en œuvre les modèles et de la modélisation dans leur enseignement. Leurs résultats mettent en exergue l'idée que la modélisation doit être essentiellement prise en charge par les enseignants. Ces auteurs ont également établi des corrélations entre la manière dont les enseignants conçoivent les modèles et la manière dont ils les utilisent dans leur enseignement. Par exemple, l'idée que les modèles sont des représentations aussi précises que possible était associée à l'idée que les modèles enseignés en classe doivent représenter le plus fidèlement possible les modèles scientifiques reconnus par la communauté scientifique. Parmi les principales fonctions que les enseignants attribuent aux modèles, c'est de loin la fonction d'explication qui est rapportée par les enseignants. Pour eux, les modèles contribuent de manière significative au développement de la compréhension des élèves lorsqu'ils fournissent des réponses à leurs questions. La fonction prédictive des modèles occupe une place secondaire dans le discours des enseignants. L'analyse des pratiques déclarées des enseignants montre que la modélisation comme une activité prise en charge par les élèves, bien que souhaitée par les enseignants, n'est pas réellement opérationnalisée en classe. Certains enseignants ont même affirmé qu'ils ne fournissent

---

<sup>27</sup> Même échantillon que l'étude précédente.

aucune possibilité aux élèves de s'engager dans des activités de modélisation. Ces auteurs concluent leur étude en disant que la moitié des enseignants n'a pas les compétences requises pour enseigner les modèles et la modélisation selon une perspective constructiviste.

Van Driel et Verloop (2002) ont étudié les connaissances pratiques (« teacher's practical knowledge »)<sup>28</sup> de 81 enseignants néerlandais expérimentés du secondaire de différentes disciplines (biologie, chimie et physique) sur les modèles et la modélisation en sciences. L'analyse des pratiques déclarées des enseignants a permis de dégager une dichotomie au sein de ces enseignants quant à leur utilisation des modèles à travers leurs séquences d'enseignement. Dans le premier sous-groupe, la visée de l'enseignement des modèles et de la modélisation est l'acquisition de modèles scientifiques spécifiques. Les séquences d'enseignement proposées par les enseignants de ce sous-groupe sont constituées de tâches prises en charge essentiellement par l'enseignant. Dans le deuxième sous-groupe, la visée de l'enseignement des modèles et de la modélisation est l'acquisition de connaissances sur la pratique de la modélisation et de connaissances d'ordre épistémologique sur les modèles et la modélisation. Contrairement au premier sous-groupe, les séquences d'enseignement proposées par les enseignants de ce sous-groupe sont constituées de tâches prises en charge essentiellement par les élèves. Les séquences d'enseignement proposées offrent à la fois aux élèves des occasions de concevoir des modèles et de réfléchir sur la nature des modèles construits. Par ailleurs, les enseignants de ce sous-groupe auraient une perception plus positive des habiletés de modélisation de leurs élèves.

Henze *et al.* (2007) ont étudié les connaissances personnelles (teachers' personal knowledge) des modèles et de la modélisation chez 9 enseignants néerlandais de sciences de la 10<sup>e</sup> à la 12<sup>e</sup> année du secondaire. L'analyse des pratiques déclarées des enseignants obtenues à partir d'entrevues individuelles et de grilles d'analyse (« Repertory Grid instrument »)<sup>29</sup> a permis de dégager trois modalités d'enseignement des modèles et de la modélisation en classe de sciences :

- 1) Un enseignement des modèles et de la modélisation qui comporte des activités d'enseignement

---

<sup>28</sup> Les connaissances pratiques des enseignants se composent de l'ensemble accumulé et intégré des connaissances et des croyances que les enseignants développent à l'égard de leur pratique d'enseignement (Grimmett et Mackinnon, 1992).

<sup>29</sup> Il s'agit d'une grille complétée par les enseignants qui permet de situer leur pratique d'enseignement des modèles et de la modélisation.

centrées sur l'enseignement de modèles spécifiques et qui sont le plus souvent prises en charge par l'enseignant ; 2) Un enseignement des modèles et de la modélisation qui combine à la fois des activités d'enseignement centrées sur l'enseignement de modèles spécifiques et des activités d'enseignement menant à une réflexion critique sur la nature et le rôle des modèles en sciences ; 3) Un enseignement des modèles et de la modélisation qui combine à la fois des activités d'enseignement centrées sur la production et la révision des modèles par les élèves et des activités d'enseignement menant à une réflexion critique sur la nature et le rôle des modèles en sciences. Les résultats de cette étude ainsi que celle de Van Driel et Verloop (2002) montrent que les pratiques d'enseignement des enseignants n'offrent pas toutes les mêmes opportunités aux élèves pour le développement de compétences sur la modélisation : alors que certaines pratiques s'inscriraient dans une logique transmissive des modèles, d'autres permettraient davantage aux élèves de s'engager intellectuellement dans la construction de certains modèles et de se construire une compréhension de la nature des modèles et de la modélisation.

Enfin, les résultats d'une étude que nous avons menée (Roy et Hasni, 2014) sur les pratiques d'enseignement déclarées des modèles et de la modélisation chez cinq enseignants québécois de sciences et technologies du secondaire révèlent que ceux-ci ont une compréhension partielle de ces objets d'étude et de leurs finalités éducatives. Si les enseignants sont en mesure de donner plusieurs exemples de modèles en sciences, ils ont de la difficulté à énoncer des attributs pour les caractériser. La représentation simplifiée d'une entité du monde réel, laquelle est le plus souvent associée à un objet physique, et le caractère évolutif des modèles sont les deux principales caractéristiques des modèles évoquées par les enseignants. D'autres caractéristiques importantes comme leur multiplicité pour la représentation d'un même référent et leur position intermédiaire entre la théorie et le phénomène ne sont pas jamais évoquées. Les modèles physiques sont de loin ceux qui représentent le plus ce qu'est un modèle en sciences, alors que les modèles mathématiques sont exclus des modèles scientifiques, soit parce qu'ils sont étroitement associés à la pure réalité, soit parce qu'ils sont simplement considérés comme des outils ou des techniques de mathématiques qui permettent de visualiser des objets en sciences. Quant aux attributs utilisés par les enseignants pour décrire ce qu'est une démarche de modélisation, ils sont essentiellement reliés à la phase expérimentale de la démarche, en ce sens que la démarche doit amener les élèves à construire, tester et réviser un modèle, alors que les phases de problématisation et de conceptualisation

demeurent en marge du discours des enseignants. Quant aux finalités éducatives associées aux modèles et à la modélisation, ce sont les fonctions de représentation et d'explication des phénomènes en vue d'approfondir la compréhension conceptuelle chez les élèves qui sont au premier plan. La fonction de prédiction des phénomènes reste en marge de la démarche de modélisation.

#### **4.2 L'étude des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans le cadre de recherches collaboratives**

Parmi les travaux fondamentaux qui se sont intéressés aux pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en sciences, les travaux francophones de Tiberghien et ses collègues réalisés en classe de physique au secondaire (Malkoun, 2007 ; Seck, 2008 ; Tachoua, 2005 ; Tiberghien, Le Maréchal, Cross et Malkoun, 2007b ; Tiberghien et Buty, 2007 ; Tiberghien et Malkoun, 2007, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) sont à prendre en compte. Leurs problématiques concernent l'analyse des pratiques de classe dans le contexte de recherches collaboratives en vue de les relier à l'évolution des performances des élèves entre le début et la fin de séquences d'enseignement. Ces travaux sont notamment menés par des chercheurs en didactique des sciences du laboratoire *Interactions Corpus Apprentissage Représentation* (ICAR) de l'École normale supérieure de Lyon qui collaborent avec plusieurs groupes d'enseignants d'une même discipline pour concevoir des ressources pour l'enseignement et la formation continue à partir de résultats de recherche et de l'expérience professionnelle des enseignants (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011). Ces groupes de recherche et développement, appelés groupes SESAMES (Situations d'Enseignement Scientifique : Activités de Modélisation, d'Évaluation et de Simulation) regroupent plus particulièrement des chercheurs et des enseignants du secondaire (collège et lycée). Ils recourent à des recherches collaboratives (Bell, 2003 ; Méheut et Psillos, 2004) en didactique des sciences dont la conception des séquences d'enseignement s'appuie sur des travaux de la psychologie cognitive portant sur le fonctionnement du savoir et l'apprentissage des élèves (Veillard *et al.*, 2011).

Les fondements théoriques et méthodologiques retenus par ces chercheurs sont issus essentiellement de deux types de travaux : 1) Des travaux dans le champ de la didactique comparée qui considèrent les pratiques d'enseignement en tant que constructions conjointes de l'enseignant



et des élèves et qui attribuent aux savoirs disciplinaires une place centrale dans l'organisation de ces pratiques (ex. : Mercier, Schubauer-Leoni et Sensevy, 2002 ; Schubauer-Leoni, Leutenegger, Ligozat et Fluckiger, 2007 ; Sensevy, 2007 ; Sensevy, Mercier et Schubauer-Leoni, 2000 ; Sensevy et Quilio, 2002 ; Sensevy et Mercier, 2007) ; 2) Des travaux sur les modèles et la modélisation qui prennent appui sur ceux menés dans le champ de la philosophie des sciences (ex. : Bachelard, 1979 ; Black, 1954 ; 1962 ; Bunge, 1967, 1973b ; 1975 ; Damska, 1959 ; D'Espagnat, 1983 ; Giere, 1988, 1992, 1999, 2004 ; Harré, 1959, 1960, 1970, 1978, 1985 ; Hempel, 1965 ; Hesse, 1953, 1961, 1963 ; Leatherdale, 1974 ; Walliser, 1977 ; Wartofsky, 1966, 1968, 1979) et de la didactique des sciences (ex. : Chomat, Larcher et Méheut, 1992 ; Johsua et Dupin, 1989, 2003 ; Larcher, 1994 ; Martinand, 1992, 1994 ; Méheut, 1996, 1997 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Tiberghien et Vince, 2005 ; Tiberghien, 1994, 2000 ; Tiberghien, Psillos et Koumaras, 1995).

Les travaux francophones de Tiberghien et ses collègues s'intéressent aux interactions sociales (enseignant-élèves et élèves-élèves) et à leurs effets sur la compréhension conceptuelle des élèves dans différents domaines de la physique (optique, dynamique, etc.) en analysant, entre autres, la nature du lien entre le discours de l'enseignant et l'évolution de la compréhension conceptuelle des élèves du point de vue des processus de modélisation pris en charge par les enseignants et les élèves. Les travaux réalisés par Malkoun (2007), Seck (2008) ou Tachoua (2005) dans le cadre de leur thèse de doctorat en constituent des exemples emblématiques.

#### **4.3 L'étude des pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation dans le domaine de la cinématique**

Si les travaux réalisés par Tiberghien et ses collègues sont pour nous d'un grand intérêt scientifique en raison des théories retenues pour analyser les pratiques de classe comme la théorie de l'action conjointe du professeur et des élèves, nous souhaitons apporter un regard nouveau, tant sur le plan des objectifs de la recherche, que sur celui des fondements théoriques et méthodologiques associés au concept de pratiques d'enseignement. Plutôt que d'analyser les pratiques de classe d'enseignants formés sur des approches d'enseignement de la modélisation dans le cadre de recherches collaboratives (c'est-à-dire sur des projets de recherche visant à concevoir et analyser des séquences d'enseignement innovantes basées sur la modélisation en physique), nous

souhaitons caractériser les pratiques d'enseignement ordinaires des enseignants, c'est-à-dire ce qu'ils font habituellement en classe lorsqu'ils enseignent les modèles et la modélisation. Les orientations des études rapportées dans les sous-sections 4.1 et 4.2 laissent présager que les pratiques d'enseignement des enseignants sont la plupart du temps appréhendées selon deux perspectives mises en opposition. Alors que les premières visent à décrire ce que les enseignants prétendent faire en classe sur les modèles et la modélisation en prenant fortement en compte leurs points de vue par le biais de questionnaires, d'entrevues, de grilles d'analyse, etc., les secondes visent à décrire ce que les enseignants font effectivement en classe en s'appuyant sur des enregistrements vidéos, mais sans nécessairement prendre en compte leurs intentions éducatives associées à l'enseignement de ces objets d'étude. Contrairement à plusieurs chercheurs, nous n'analysons pas les pratiques d'enseignement dans une perspective dichotomique. En conséquence, nous donnons un sens particulier au concept de pratique d'enseignement. Par ailleurs, nous postulons que pour mieux comprendre comment se fait l'enseignement des modèles et de la modélisation en classe de physique, il est nécessaire de délimiter plus largement le cadre autour duquel ce phénomène est étudié. Nous partageons avec Bru (2002, p. 68) l'importance « de travailler à la construction de modèles de la pratique susceptibles de fournir un cadre de lecture des pratiques enseignantes ». Or, la production de tels modèles de la pratique s'inscrit plus particulièrement dans une visée descriptive, compréhensive et explicative (et non dans une visée prescriptive, normative ou applicationniste pour la pratique) et nécessite d'appréhender la pratique d'enseignement dans sa multidimensionnalité (Lenoir, 2014 ; Lenoir et Vanhulle, 2006). Appréhender la pratique d'enseignement dans une telle perspective, c'est reconnaître, comme le souligne Lenoir (2014), que celle-ci se situe à la convergence d'un enchevêtrement de dimensions liées à l'évolution du système scolaire et aux réalités sociales (dimensions contextuelles et historiques), au cadre de référence de l'enseignant (dimensions curriculaires, épistémologiques, socioaffectives, morales et éthiques) et à l'actualisation de ce cadre au sein des pratiques d'enseignement (dimensions didactiques, psychopédagogiques, organisationnelles, médiatrices). Ces propos nous conduisent à affirmer l'importance de considérer non seulement la manière dont l'enseignant enseigne des contenus disciplinaires en classe, mais aussi le sens qu'il donne à ses actions, les finalités qu'il poursuit et les contraintes avec lesquelles il doit composer afin de favoriser la mise en œuvre par les élèves des processus d'apprentissage les plus appropriés. En conséquence, nous recourons à plusieurs dimensions de la pratique d'enseignement (dimensions

conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle et organisationnelle)<sup>30</sup> afin de construire des modélisations/configurations plus globales des pratiques d'enseignement des deux enseignants retenus.

Enfin, notre étude apporte un regard nouveau sur les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans un domaine de la physique qui n'a pas beaucoup fait l'objet d'une exploration. En effet, la majorité des études qui a porté sur les pratiques d'enseignement de physique a été réalisée dans le domaine de la dynamique : la cinématique n'a pas fait l'objet d'une exploration sous l'angle des pratiques d'enseignement ordinaires. Par ailleurs, si ce domaine est fondamental dans l'étude de la physique mécanique, il s'avère également difficile pour les élèves (Hestenes, Wells et Swackhamer, 1992, p. 3) : « Nous pensons que la cinématique est le sujet le plus difficile de la physique mécanique élémentaire. Ce sujet est probablement le plus fondamental, car comme Newton l'a affirmé dans la préface de son œuvre *Principia Mathematica*, c'est à partir des mouvements des objets que l'on a découvert les forces. »<sup>31</sup>. Les propos d'Hestenes *et al.* (1992) peuvent être appuyés par plusieurs études empiriques qui montrent que la cinématique est un domaine de la physique qui pose de nombreux défis pour les élèves à l'école obligatoire et post obligatoire. En effet, un nombre important de travaux mettent en évidence la difficulté des élèves à recourir à des concepts appropriés pour modéliser des phénomènes de cinématique comme ceux de temps (Dumas-Carré, Goffard et Gil, 1992) et de référentiel (Panse et Kumar, 1994 ; Ramadas, Barve et Kumar, 1996 ; Saltiel, 1978 ; Saltiel et Malgrange, 1979, 1980). Plus particulièrement, l'utilisation des concepts de position, de déplacement, de vitesse et d'accélération dans des situations expérimentales impliquant la modélisation du mouvement d'objets matériels dans un espace à une dimension pose des défis de taille (Bowden *et al.*, 1992 ; Coppens, 2003 ; Halloun et Hestenes, 1985a, 1985b ; Labudde, Reif et Quinn, 1988 ; Trowbridge et McDermott, 1980, 1981). Halloun et Hestenes (1985a, 1985b) rapportent que souvent les élèves ne différencient pas la vitesse moyenne de la vitesse instantanée en la définissant comme un rapport entre la distance totale et le temps et Labudde *et al.* (1988) soulignent pour leur part que les élèves ont généralement une faible

---

<sup>30</sup> Nous y reviendrons dans le cadre d'analyse.

<sup>31</sup> Traduction libre : « We think that kinematics is the most difficult topic in elementary mechanics. It may be the most fundamental as well, for, as Newton asserted in the preface to his *Principia*, it is from the motions of objects that we discover the forces » (Hestenes, Wells et Swackhamer, 1992, p. 3)

compréhension de l'accélération en l'associant à la vitesse à un instant donné plutôt qu'à sa variation entre deux instants voisins. La modélisation du mouvement d'objets matériels dans un espace à deux dimensions (mouvement des projectiles) pose également des défis de taille (Caramazza, McCloskey et Green, 1981 ; Reif et Allen, 1992 ; Whitaker, 1983). Enfin, d'autres auteurs pointent du doigt la difficulté des élèves à mobiliser des registres de représentation sémiotique en vue de modéliser des phénomènes physiques, notamment le registre graphique (Goldberg et Anderson, 1989 ; McDermott, Rosenquist et Zee, 1987) et le registre vectoriel (Aguirre et Rankin, 1989 ; Jiménez-Valladares et Perales-Palacios, 2001 ; Genin, Michaud-Bonnet et Pellet, 1987 ; Malgrange, Saltiel et Viennot, 1973 ; Meltzer, 2005 ; Shaffer et McDermott, 2005).

Notre étude sur les pratiques d'enseignement ordinaires s'inscrit dans la continuité des travaux qui explorent la relation forte entre les pratiques d'enseignement et les apprentissages des élèves (ex. : Bressoux, 2001 ; Bru, Altet et Blanchard-Laville, 2004 ; Mercier et Buty, 2004 ; Tupin, 2003). Elle s'inscrit également dans le mouvement de professionnalisation des enseignants enseignants fortement exprimé au Québec depuis le début des années 2000 (Gouvernement du Québec, 2001) et ailleurs dans les pays de l'OCDE (Baron, 2004), et dans lequel on soutient que l'utilisation de savoirs issus de la recherche est un facteur crucial pour assurer l'amélioration des pratiques d'enseignement et un meilleur développement professionnel des enseignants (Conseil Supérieur de l'Éducation, CSE, 2004, 2005, 2006). En ce sens, le rapport du CSE (2004) *Un nouveau souffle pour la profession enseignante* rappelle que le développement des recherches qui portent sur l'enseignement lui-même fournit des assises à la professionnalisation de l'enseignement, en permettant la rationalisation des savoirs et des savoir-faire mobilisés dans l'acte d'enseignement et en favorisant le développement d'une expertise enseignante. Si dans le rapport intitulé *Les états généraux sur l'éducation. Exposé de la situation* (Gouvernement du Québec, 1996, p. 33) le ministère de l'Éducation du Québec relevait que dans toute réforme positive et sérieuse de l'école « la qualité de l'enseignement passe d'abord par la formation d'enseignants compétents », il ajoutait quelques années plus tard que cet objectif ne peut être atteint que par une bonne connaissance préalable de l'action effective de l'enseignant en classe (CSE, 2004).

La consultation des principales revues scientifiques canadiennes qui s'intéressent à l'éducation scientifique et technologique pour la dernière décennie montre une absence de travaux

qui ont porté sur les pratiques d'enseignement ordinaires des enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire sous l'angle des modèles et de la modélisation, alors que ces objets d'étude font partie des composantes fondamentales d'enseignement et d'apprentissage du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (Gouvernement du Québec, 2009) et qu'ils sont au cœur du fonctionnement du savoir en physique (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1973 ; Tiberghien, 1994).

C'est dans cette problématique que s'inscrit notre recherche doctorale. Elle s'intéresse aux modèles et à la modélisation dans les pratiques d'enseignement d'enseignants québécois dans le domaine de la cinématique. Son objectif général est de caractériser et comparer la singularité des pratiques d'enseignement ordinaires de deux enseignants de 5<sup>e</sup> secondaire (pour des élèves âgés d'environ 16 ans) de manière à dégager leur potentialité sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes (chute libre, mouvements d'objets matériels sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.). Plus précisément, il s'agit de dégager certaines caractéristiques des pratiques de modélisation favorables aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Les pratiques d'enseignement des enseignants sont appréhendées dans leur multidimensionnalité et les analyses menées sur celle-ci s'inscrivent dans visée descriptive, compréhensive et explicative.

## DEUXIÈME CHAPITRE : LE CADRE CONCEPTUEL

Dans le cadre conceptuel, nous développons les trois concepts-clés qui structurent notre recherche : les concepts de modèle, de modélisation et de pratique d'enseignement. La recherche d'une définition du concept de modèle en sciences dans la documentation scientifique met en évidence le caractère polysémique de ce concept par la grande diversité des typologies et des définitions utilisées par les auteurs. Néanmoins, notre analyse de la documentation scientifique, en se basant en particulier sur le point de vue des épistémologues, a permis de dégager cinq attributs essentiels pour caractériser le concept de modèle en sciences et sa transposition didactique dans l'éducation scientifique. Dans la seconde partie du cadre conceptuel, il s'agit de définir les processus permettant aux élèves de modéliser des phénomènes à partir des outils de la physique. Ici, nous définissons, dans un premier temps, le concept de modélisation sous l'angle d'un processus mettant en relation le monde concret (appelé aussi le monde des objets et des événements ou le registre empirique) et le monde conceptuel (appelé aussi le monde des théories et des modèles ou le registre théorique). Dans un deuxième temps, nous appréhendons la modélisation comme un cas particulier des démarches d'investigation scientifique en distinguant deux orientations théoriques possibles de cette démarche en classe de physique : la démarche de modélisation inductiviste-applicationniste et la démarche de modélisation constructiviste. Ces deux démarches se distinguent par leurs configurations emblématiques en portant des éclairages distincts sous plusieurs aspects : leur paradigme de référence, les finalités de l'expérimentation scientifique, le statut conféré au modèle ainsi qu'aux connaissances initiales des élèves dans le processus de problématisation. En nous appuyant sur plusieurs travaux portant sur les démarches de modélisation en physique, ainsi que sur les construits de problématisation, de contextualisation, de conceptualisation et de démarche d'investigation scientifique, nous développons une démarche de modélisation constructiviste cyclique s'articulant autour de quatre phases dynamiques : *problématiser ; planifier ; investiguer, conceptualiser et déployer*. Dès lors, les troisième et quatrième parties du cadre conceptuel sont consacrées à exposer les spécificités de la modélisation dans le contexte de la cinématique du point matériel en convoquant les concepts fondamentaux (point matériel, référentiel, variables du mouvement) nécessaires à la modélisation de phénomènes physique par les modèles du mouvement rectiligne uniforme, du mouvement rectiligne uniformément accéléré et du mouvement balistique. Une analyse conceptuelle du domaine de la

cinématique permet ensuite d'introduire le concept de facettes de savoirs pour accéder à la compréhension des phénomènes physiques par les élèves. Enfin, dans la cinquième partie, nous définissons la pratique d'enseignement comme une activité finalisée, à la fois universelle et singulière, multimodale, multidimensionnelle et que nous appréhendons comme une action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage. Mis en relation, les concepts-clés de ce cadre conceptuel permettent d'opérationnaliser un cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans le champ de la physique.

## **1. LE CONCEPT DE MODÈLE**

### **1.1 Une grande diversité de typologies des modèles**

En sciences, les modèles sont nombreux et diversifiés et s'opérationnalisent dans plusieurs disciplines scientifiques. Si la documentation scientifique fait état d'une absence de consensus quant à la manière de catégoriser les types de modèles en sciences et dans l'éducation scientifique, elle laisse néanmoins apparaître que les catégorisations des modèles avancées par les chercheurs mettent en évidence leur statut ontologique (modèle mental, modèle matérialisé, etc.), leur rapport à la réalité (monde empirique, monde théorique, etc.), les registres de représentation sémiotique qu'ils les structurent (modèle concret, modèle mathématique, etc.), leurs fonctions (modèle descriptif, modèle prédictif, etc.) ou encore leur communauté d'appartenance (scientifique, scolaire, etc.) (Black, 1962 ; Boulter et Buckley, 2000 ; Giere, 1999 ; Gilbert et Boulter, 1998 ; Halloun, 2004 ; Harris, 1999 ; Hesse, 1953). Enfin, d'autres comme Harrison et Treagust (2000) proposent une catégorisation hybride des modèles.

#### *1.1.1 Des modèles catégorisés selon leur statut ontologique*

Parmi les typologies des modèles proposées dans la documentation scientifique figure celle associée au statut ontologique du modèle qui met en évidence son mode de matérialisation (mental ou matériel). Même si cette typologie s'inscrit dans une perspective psychologique de l'apprentissage, nous considérons important de l'évoquer, car elle met en tension deux types de

modèles dont le second est construit sur la base du premier. Il s'agit, d'une part, des *modèles mentaux* (« mental models ») référant à des structures cognitives accessibles seulement au modélisateur lui-même et, d'autre part, des *modèles externes* (« external models »), appelés aussi modèles exprimés (« expressed models »), référant à des structures pouvant être accessibles à divers destinataires (ex. à l'enseignant et à tous les élèves de la classe). Les *modèles mentaux* (« mental models ») possèdent plusieurs caractéristiques, parmi lesquelles au moins cinq méritent d'être considérées (Franco et Colinviaux, 2000 ; Gilbert et Boulter, 1998, 2000 ; Gilbert *et al.*, 2000 ; Gilbert, 2004 ; Gilbert *et al.*, 1998a, 1998b ; Gobert et Buckley, 2000 ; Johnson-Laird, 1983 ; Norman, 1983 ; Philippi, 2010 ; Renk, Granch et Chang, 1993 ; Vosniadou, 1994 ; Williams, 2011) : 1) Ils sont des représentations internes et personnelles. Pour Redish (1994, p. 797), les modèles mentaux consistent en une « collection de schémas mentaux que les personnes construisent pour organiser leurs expériences liées à un sujet particulier »<sup>32</sup>. Ils sont des représentations explicatives et prédictives créées dans un domaine spécifique qui existent dans la pensée en tant que description d'un système, d'une théorie et d'un phénomène ; 2) Ils sont contraints par des visions du monde. En tant que représentations uniques et personnelles, ils se développent et s'opérationnalisent en fonction des croyances, représentations et conceptions des individus, lesquelles seraient circonscrites à l'intérieur d'un ensemble limité de possibilités ; 3) Ils impliquent l'utilisation de connaissances tacites. Que ce soit lors de leur développement, de leur utilisation ou de leur révision, les individus ne sont jamais complètement conscients des modèles mentaux qui structurent leur pensée ; 4) Ils sont des représentations synthétiques. À ce sujet, Norman (1983) affirme que les modèles mentaux n'ont pas besoin d'être techniquement précis, mais ils doivent être fonctionnels et permettre aux personnes d'affirmer ce qu'ils croient. Ainsi, les modèles mentaux créés et utilisés par les élèves peuvent être « incomplets (...) instables. (...) ne pas avoir des frontières clairement définies (...) non scientifiques (...) parcimonieux »<sup>33</sup> (Norman, 1983, p. 8) ; 5) Ils ont plusieurs fonctions comme la génération, la compréhension, la communication, l'explication, la visualisation et la prédiction. Les *modèles externes* constituent l'expression des modèles mentaux en tant que représentations externes d'un référent qui s'exprime

---

<sup>32</sup> Traduction libre : « collection of mental patterns people build to organize their experiences related to a particular topic » (Redish, 1994, p. 797).

<sup>33</sup> Traduction libre : « incomplete . . . unstable . . . do not have firm boundaries . . . unscientific . . . parsimonious » Norman (1983, p. 8).



à travers des actions ou des descriptions orales, écrites, schématiques, etc. Ils consistent en quelque sorte à une matérialisation concrète des modèles mentaux<sup>34</sup> (Boulter et Buckley, 2000 ; France, 2000 ; Gilbert, 2004 ; Mellar *et al.*, 1994 ; Nersessian, 1999 ; White et Frederiksen, 1990 ; Zimmermann, 2000).

Ainsi, dans le contexte de l'enseignement de la physique, Ornek (2006) distingue les *modèles mentaux* et les *modèles conceptuels* (« conceptual models »), ces derniers étant des représentations externes des modèles mentaux socialement construites, partagées et conçues de manière à favoriser la compréhension des phénomènes. Cet auteur souligne que les modèles conceptuels dans le domaine de la physique comprennent essentiellement les modèles physiques (« physical models »), les modèles informatiques (« computer models ») et les modèles mathématiques (« mathematical models »). Ces propos nous conduisent à dire que les modèles mentaux ont un certain intérêt en didactique de la physique<sup>35</sup>. Comme le souligne le didacticien de la physique Hestenes (2007, 2010), ces modèles s'articulent autour d'une double structure : une structure physique, qui fait référence à une intuition physique et relevant des objets et des événements du monde réel, et une structure mathématique, qui fait référence à une intuition mathématique et relevant des représentations symboliques.

### 1.1.2 Des modèles catégorisés selon leur rapport à la réalité

Pour certains chercheurs, c'est sous l'angle du rapport que le modèle entretient avec la réalité (monde empirique, monde théorique, etc.) que la catégorisation s'effectue. Par exemple, Giere (1999) distingue quatre types de modèles : les *modèles représentatifs* (« representative models »), les *modèles abstraits* (« abstract models »), les *modèles d'hypothèses* (« hypotheses models ») et les *modèles théoriques* (« theoretical models ») ; ces derniers étant des modèles abstraits construits sur la base de principes théoriques. Bunge (1975) distingue les *théories générales* qui sont des abstractions produites par la raison et l'intuition en mesure de s'appliquer potentiellement à

---

<sup>34</sup> Nous pensons toutefois que les modèles externes produits par les élèves ne recouvrent pas nécessairement les modèles mentaux. Ces derniers ne sont pas communicables en totalité et une part d'implicite subsiste nécessairement.

<sup>35</sup> Dans le cadre conceptuel, nous expliciterons comment les élèves construisent un ou des modèles matérialisés d'un phénomène à partir de leurs *modèles explicatifs hypothétiques initiaux* au sein d'une démarche de modélisation constructiviste.

n'importe quel domaine du réel, les *modèles d'objets* représentant les propriétés communes d'un ensemble d'objets et les *modèles théoriques* produits lorsqu'une théorie générique est appliquée sur un modèle d'objets. Selon Bunge (1975), un *modèle théorique* occupe une position intermédiaire entre une idéalisation et une généralisation produite par la simplification d'objets réels (le modèle d'objets) et une théorie. Quant à Harris (1999), il distingue trois types de modèles : les *modèles théoriques* (« theoretical models ») qui sont des représentations abstraites, les *modèles expérimentaux* (« experimental models »), qui sont des modèles spécifiquement conçus pour mettre à l'épreuve les modèles théoriques, et les *modèles de données* (« data models »), structurés autour de données manipulées par les scientifiques. Dans cette même perspective, Lehrer et Schauble (2003) distinguent quatre types de modèles : les *modèles physiques* (« physical models ») ; les *modèles représentatifs* (« representative systems »), construits sur la base des similitudes avec le monde réel ; les *modèles syntaxiques* (« syntactic models »), qui décrivent comment les systèmes fonctionnent, et les *modèles hypothéticodéductifs* (« hypothetical-deductive models »), qui consistent en des abstractions formelles.

### 1.1.3 Des modèles catégorisés selon les registres de représentation sémiotique

Les registres de représentation sémiotique sont fréquemment utilisés pour catégoriser les modèles en sciences. Une telle typologie met en exergue l'idée selon laquelle les modèles peuvent être représentés par une grande diversité de registres de représentation sémiotique comme les objets matériels, les schémas, les représentations algébriques, graphiques ou vectorielles, les animations, les simulations informatiques, les analogies, etc. (Drouin, 1988 ; Hasni, 2010 ; Robardet et Guillaud, 1997). Dans cette typologie, c'est la forme que prend le modèle qui est en jeu : forme concrète et matérielle pour les modèles à l'échelle, forme métaphorique ou picturale pour les modèles analogiques, forme d'une théorie (comprenant éventuellement divers langages et représentations visuelles) pour le modèle théorique et forme logicomathématique pour les modèles mathématiques. À titre d'exemple, Robardet et Guillaud (1997, p. 98) distinguent deux grands types de modèles : 1) les *modèles physiques*<sup>36</sup> (ou maquettes) qui « traduisent les phénomènes sous forme de représentations concrètes, homothétiques (modèles réduits), ou analogiques (modèles

---

<sup>36</sup> À cette catégorie, les auteurs incluent les modèles descriptifs et les modèles images (Halbwachs, 1974).

analogiques) » et qui constituent un schéma simplificateur qui se substitue à la grande complexité de la nature ; 2) les *modèles symboliques* (ou isohyliques) qui font appel aux langages logicomathématiques. À la catégorie des modèles physiques, Robardet et Guillaud (1997) incluent les modèles descriptifs et les modèles images (Halbwachs, 1974). Ces modèles incluent, par exemple, les maquettes utilisées en astronomie pour comprendre le mouvement des corps célestes, les schémas de principe utilisés en technologie pour comprendre le fonctionnement des objets techniques et l'analogie d'une pompe hydraulique utilisée en biologie pour illustrer le fonctionnement du cœur. Quant aux modèles symboliques, citons les équations mathématiques ou les graphiques utilisés en physique pour décrire le mouvement rectiligne uniformément accéléré d'objets en chute libre. Plusieurs chercheurs soutiennent d'ailleurs que l'enseignement de la physique nécessite plus particulièrement le recours à des modèles mathématiques dans lesquels les propriétés des systèmes physiques sont représentées par des relations quantitatives et qualitatives (Grandy, 2003 ; Hestenes, 1987, 1992 ; Tiberghien, 1994). Enfin, c'est aussi le cas de Grandy et Duschl (2007) qui proposent une catégorisation des modèles selon les registres de représentation sémiotique qu'ils les structurent en distinguant cinq types de modèles : les *modèles mathématiques*, les *modèles physiques*, les *modèles informatiques*, les *modèles visuels* et les *modèles analogiques*. De notre point de vue, cette typologie apporte toutefois le risque que le modèle soit confondu avec les modes de représentation utilisés pour le représenter<sup>37</sup>.

#### 1.1.4 Des modèles catégorisés selon leurs fonctions

Walliser (1977), qui a conceptualisé le processus de modélisation en sciences, propose une catégorisation des modèles selon leurs fonctions en distinguant quatre types de modèles, lesquels englobent chacun deux sous-types : 1) les *modèles cognitifs* permettant de déduire des propriétés nouvelles d'un système (*modèle explicatif*) et de fournir une représentation aussi bonne que possible de ce système, en rendant compte des relations entre les entrées et sorties du système et en précisant l'influence relative des diverses variables d'entrée (*modèle descriptif*) ; 2) les *modèles*

---

<sup>37</sup> La confusion entre le modèle et le registre de représentation sémiotique a d'ailleurs été observée dans notre analyse des pratiques d'enseignement. Nous y reviendrons plus loin dans les résultats.

*prévisionnels* permettant d'inférer le comportement du système dans des situations non encore observées (*modèle de simulation*) et d'évaluer la valeur des sorties dans le futur, à partir de la connaissance des variables d'entrée et de la relation entrée-sortie du système (*modèle de prévision*) ; 3) les *modèles décisionnels* permettant de fournir à un décideur des informations en vue d'éclairer une décision de manière à modifier le système (*modèle de décision*) et fournir les valeurs optimales des variables de commande en regard de certains objectifs, compte tenu des variables d'entrée (*modèle d'optimisation*) ; 4) les *modèles normatifs* permettant de représenter plus ou moins bien un système à créer, en mettant en évidence certaines propriétés souhaitables (*modèle prescriptif*) et de proposer une épure d'un système reliant certaines propriétés des entrées et des sorties (*modèle constructif*). En mettant en avant l'idée que la description et l'explication des régularités des phénomènes font partie des principales finalités de la recherche scientifique, Halloun (2004) distingue entre deux types de modèles, les *modèles descriptifs* (« descriptive models ») et les *modèles explicatifs* (« explanatory models »), et définit le *modèle descriptif* comme celui où il est possible de mettre directement en relation les données observables d'un phénomène, et de les corroborer avec le modèle à construire. En physique mécanique, les modèles du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré développés par Newton sont des modèles descriptifs, car ils peuvent être construits par l'observation directe, en analysant le mouvement d'objets matériels dans le monde empirique (Hestenes, 1992, 1995). Cependant, les *modèles explicatifs* sont utiles lorsqu'il n'est pas possible de déterminer certaines causes possibles d'un phénomène à travers l'observation directe. À ce sujet, citons les modèles explicatifs qui interviennent dans la représentation de phénomènes non observables (ex. : attraction gravitationnelle d'un corps par un autre) impliquant les forces et l'énergie. Penner (2001), en s'appuyant sur Clement (1989), fait la distinction entre les *modèles opportuns* (« expedient models ») qui permettent de décrire le comportement du phénomène modélisé, mais qui n'aident pas à expliquer les processus qui sous-tendent ce comportement, et les *modèles explicatifs* (« explanatory models »), dont leur rôle principal est de proposer des explications sur le fonctionnement du phénomène. Enfin, Gilbert et al. (1998a) ajoutent une troisième catégorie aux *modèles descriptifs* et aux *modèles explicatifs* : les *modèles prédictifs* (« predictive models »)<sup>38</sup>.

---

<sup>38</sup> Ce sont les modèles dont la fonction centrale consiste essentiellement à prédire des phénomènes.

### 1.1.5 Des modèles catégorisés selon leur communauté d'appartenance

Certains auteurs classifient les modèles en faisant référence à leur contexte d'usage. Cette typologie ne prend en compte que les modèles matérialisés selon leur communauté d'appartenance. À ce sujet, Giblert et ses collègues (Boulter et Buckley, 2000 ; Gilbert et Boulter, 1998, 2000 ; Gilbert *et al.*, 2000 ; Gilbert, 2004 ; Gobert et Buckley, 2000) déclinent les *modèles matérialisés* (« expressed models ») en six sous-catégories qui s'inscrivent dans la continuité entre leur processus de production dans la communauté scientifique jusqu'à leur enseignement dans la classe de sciences<sup>39</sup> : 1) les *modèles consensuels* (« consensus models »), qui sont des modèles développés et testés et qui font l'objet d'une reconnaissance sociale auprès d'un groupe d'individus ; 2) les *modèles scientifiques* (« scientific model »), qui sont des modèles consensuels reconnus au sein d'une communauté scientifique (ex. : le modèle atomique ou le modèle de la structure du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) ; 3) les *modèles historiques* (« historical models ») qui sont des modèles scientifiques et font l'objet d'une reconnaissance à une grande échelle (reconnaissance par plusieurs scientifiques) sur période de temps importante. C'est le cas du modèle atomique de Bohr, du modèle de la loi d'Ohm en physique électrique et du modèle de la chute libre en physique mécanique ; 4) les *modèles curriculaires* (« curricular models »), qui sont versions simplifiées des modèles scientifiques ou des modèles historiques et qui font l'objet d'une prescription dans les programmes d'études officiels de sciences ; 5) les *modèles enseignés* (« teaching models »), qui constituent les transpositions didactiques personnelles des modèles curriculaires par les enseignants, avec leur interprétation, et leurs manières particulières de les exposer aux élèves ; 6) les *modèles hybrides*, qui sont des structures intermédiaires entre les modèles mentaux des élèves et les modèles consensuels (curriculaires ou scientifiques) à faire apprendre. Cette déclinaison met en exergue la nécessité d'une transposition didactique (Astolfi et Develay, 2002 ; Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint, 1997 ; Chevallard, 1991) des modèles du monde savant aux modèles dans la classe de sciences.

---

<sup>39</sup> Cette logique traduit en quelque sorte une forme de transposition didactique du savoir de référence au savoir à enseigner.

### 1.1.6 Une catégorisation hybride des modèles

La catégorisation des 10 types de modèles proposée par Harrison et Treagust (2000) est une catégorisation hybride, en ce sens que les modèles sont définis sous l'angle de plusieurs critères : leur statut ontologique, leur rapport à la réalité, les registres de représentation sémiotique qui les structurent et leur communauté d'appartenance. En effet, ces auteurs distinguent dix types de modèles : 1) les *modèles à l'échelle* (« scale models ») utilisés pour décrire les structures externes des objets et qui tiennent compte des proportions extérieures, sans nécessairement montrer la structure, les fonctions et l'utilisation interne ; 2) les *modèles pédagogiques analogiques* (« pedagogical analogical models ») partageant des informations avec le référent (Glynn, 1991) et conçus pour aider les enseignants à fournir des explications sur des phénomènes ne pouvant être observés directement ou difficilement accessibles aux élèves ; 3) les *modèles iconiques et symboliques* (« iconic and symbolic models ») associés aux symboles, aux formules, aux équations, etc. ; 4) les *modèles mathématiques* (« mathematical models ») utilisés pour représenter les propriétés et les processus physiques sous la forme de formules, d'équations ou de graphiques ; 5) les *modèles théoriques* (« theoretical models ») permettant de décrire des entités théoriques ; 6) les *cartes, diagrammes et tableaux* (« maps, diagrams and tables ») représentant des itinéraires, régularités et relations en deux dimensions et facilement visualisables par les élèves ; 7) les *modèles concepts-processus* (« concept-process models ») illustrant les processus sous-jacents aux concepts scientifiques ; 8) les *simulations informatiques* (« computer simulations ») se référant à des modèles dynamiques tels que les simulations complexes représentant le vol d'un aéronef, le réchauffement climatique, les réactions nucléaires ou bien les fluctuations de populations ; 9) les *modèles mentaux* faisant référence « à un type particulier de représentation mentale, une représentation analogique, que les individus génèrent pendant le fonctionnement cognitif » (Vosniadou, 1994, p. 48) ; 10) les *modèles synthétiques* (« synthetic models ») se référant à ce que certains auteurs (Strike et Posner, 1992 ; Vosniadou, 1994) désignent comme étant la fusion des modèles intuitifs des élèves (leurs conceptions alternatives) avec les modèles scientifiques.

## 1.2 Vers une définition du concept de modèle

La grande diversité des typologies proposées par les chercheurs pour catégoriser les modèles en sciences et dans l'éducation scientifique montre à quel point le concept de modèle est polysémique. Selon les disciplines et les auteurs, celui-ci peut prendre des significations fort différentes (Bachelard, 1979 ; Drouin, 1988 ; Johsua et Dupin, 2003 ; Justi et Gilbert, 2003 ; Orange, 1997 ; Schwarz *et al.*, 2009) et, par conséquent, il n'existe aucune définition consensuelle de ce concept dans la documentation scientifique. À ce sujet, Bachelard (1979, p. 3) affirma que « parler du concept de modèle et tenter de dégager quelques points saillants d'une histoire, même lacunaire et limitée, de ce concept est une entreprise périlleuse, étant donné le spectre très large de ses significations qui va des formalismes mathématiques aux maquettes et moulages ». Pour autant, nous partageons les propos de Drouin (1988, p. 2) qui dit qu'« espérer trouver une définition unique est sans doute chimérique, mais en rester au constat de l'usage “éclaté” du terme de modèle n'est pas satisfaisant ». Notre analyse de la documentation scientifique, en se centrant exclusivement sur les modèles matérialisés, et plus particulièrement les *modèles scientifiques* reconnus comme modèles consensuels au sein d'une communauté scientifique, permet de dégager au moins cinq principaux attributs caractéristiques d'un modèle en sciences. Nous retenons ces mêmes attributs pour définir ce qu'est un modèle dans l'éducation scientifique, plus particulièrement dans le domaine de la physique (voir [tableau 1](#) au terme de cette section).

### 1.2.1 *Un modèle est une représentation simplifiée d'une entité du monde réel*

Un modèle est une représentation simplifiée d'une entité du monde réel (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1974 ; Damska, 1959 ; Giere, 2004 ; Halbwachs, 1974 ; Walliser, 1977). L'une des principales motivations des scientifiques pour introduire les modèles dans leurs activités « repose sur leur potentialité de représentation concrète, perceptible, de concepts abstraits » (Chomat *et al.*, 1992, p. 119). Giere (2004, p. 747) souligne que « les scientifiques utilisent des modèles pour représenter les aspects du monde à des fins diverses. Dans cette perspective, les modèles sont les

principaux (mais en aucun cas les seuls) outils de représentation dans les sciences »<sup>40</sup>. Certains auteurs comme Justi et Gilbert (2000, p. 994) définissent la notion de modèle en mettant l'accent sur ce que peut représenter le modèle, c'est-à-dire « une représentation d'une idée, d'un objet, d'un événement, d'un processus ou d'un système »<sup>5</sup>. Les modèles sont des objets de simplification de la réalité, car leur construction est faite à travers des processus de résolution de problèmes qui conduisent le chercheur à sélectionner les variables pertinentes du modèle à traduire en fonction des ressemblances analogiques avec le phénomène à étudier, et à écarter volontairement l'idée de représenter les détails non signifiants de ce phénomène. Pour ainsi dire, les modèles construits prennent le sens de « schémas simplificateurs » de la réalité (Drouin, 1988). Citons, dans le domaine de la mécanique classique, le mouvement des corps en négligeant les frottements afin de construire les équations mathématiques du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Dans le champ de la physique, Gaidioz, Vince et Tiberghien (2004, p. 1030) évoquent que la construction des modèles s'inscrit dans une intention volontaire de simplifier la réalité : « Quand le physicien tente d'expliquer les phénomènes, il propose des théories et des modèles qui permettent d'analyser ou d'interpréter des situations matérielles qui constituent leur champ de validité ; dans certains cas, ils permettent aussi de faire des prévisions de certains événements. Pour y parvenir, le physicien doit souvent simplifier, idéaliser, modéliser la situation expérimentale ». Chomat *et al.* (1992, p. 119) évoquent des propos similaires lorsqu'ils font référence à l'activité de modélisation du physicien.

Dans son effort pour rendre intelligible le monde qui l'entoure, le physicien construit et utilise des modèles. Cette activité de modélisation nécessite tout d'abord de repérer et d'analyser des faits. À cette première étape qui débouche sur une description phénoménologique du monde, le physicien peut en associer une autre qui consiste à simuler des phénomènes à l'aide de **modèles ayant une fonction figurative** et qui sont alors des instruments d'intelligibilité de ces phénomènes.

Considérant que les modèles sont construits en fonction des représentations que le chercheur se fait du réel à étudier, ils constituent une véritable « construction de l'esprit » (Drouin, 1988) qui permet à la fois de produire des « idées simplifiantes » et des « représentations partisans »

---

<sup>40</sup> Traduction libre : « Scientists use models to represent aspects of the world for various purposes. In this view, it is models that are the primary (though by no means the only) representational tools in the sciences » (Giere, 2004, p. 747).



(Bouleau, 1999). Par sa nature, le modèle constitue une représentation simplifiée du référent et, en conséquence, il n'a ni besoin de représenter l'ensemble du référent, ni besoin d'être une représentation semblable au référent (Suarez, 1999). Selon des scientifiques de plusieurs disciplines, les modèles se caractérisent par la simplification et des omissions intentionnelles dans le but de capturer l'essence même de ce qui est représenté (Bailer-Jones, 2002). Cette caractéristique des modèles découle du fait que la réalité ne peut être appréhendée entièrement par l'être humain. C'est en ce sens que le philosophe allemand Emmanuel Kant insistait, il y a deux siècles, sur la nécessité de distinguer le « noumène » (la chose en soi) du « phénomène » (la chose pour soi). Les phénomènes constituent le monde tel que nous le percevons avec nos sens, nos instruments d'observation ou de mesure, nos concepts, notre culture, etc. Par opposition à ce qu'est en soi la chose réellement existante, les noumènes révèlent un monde dont l'existence est au contraire indépendante de notre expérience. Selon Kant, la chose en soi échappe à la connaissance et à la raison et seuls les phénomènes sont accessibles. La physique, si elle est considérée dans cet état esprit, n'a donc affaire qu'aux phénomènes qu'il conviendra de ne jamais confondre avec le réel en soi. En décrivant la physique du physicien, Halbwachs (1975, p. 20) souligne d'ailleurs que

les situations physiques appartiennent à une réalité qui est toujours plus complexe et plus riche que nos modèles, qui est en fait inépuisable. De plus, la transcription mathématique (mesure) des transformations expérimentales, et leurs lois de composition, ne nous sont accessibles que de façon approximative (précision limitée de toute mesure). C'est pourquoi, malgré le parallélisme [...] entre modèle et situation, il existe entre ces deux systèmes des différences profondes. Ces différences font que jamais **le modèle ne peut être considéré comme une représentation exacte et complète de la situation.**

L'idée d'existence d'un monde réel derrière le monde des sensations a été aussi exprimée par Einstein (Einstein et Infeld, 1948, p. 34-35) dans sa célèbre analogie concernant un homme qui essaie de contempler le mécanisme d'une montre fermée.

Dans l'effort que nous faisons pour comprendre le monde, nous ressemblons quelque peu à l'homme qui essaie de contempler le mécanisme d'une montre fermée. Il voit le cadran et les aiguilles en mouvement, il entend le tic-tac, mais il n'a aucun moyen d'ouvrir le boîtier. S'il est ingénieux, il pourra se former quelques images du mécanisme, qu'il rendra responsable de tout ce qu'il observe, mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations. Il ne sera jamais en état de comparer son image avec le mécanisme réel, et il ne peut même pas se représenter la possibilité ou la signification d'une telle comparaison.

L'idée d'existence d'un monde réel derrière le monde des sensations constitue ce que Robardet et Guillaud (1997) appellent le « paradigme contemporain du réalisme abstrait ». Selon ces auteurs, la plupart des physiciens adhèrent à ce paradigme, et ce paradigme fait partie de ceux que nous adoptons. Ainsi, la théorie et le phénomène entretiennent entre eux un rapport de nature dialectique, en ce sens que la théorie permet de représenter le phénomène, ce dernier étant une portion de la réalité telle qu'appréhendée par le physicien, et que le phénomène est interprété par la théorie (**figure 3**).

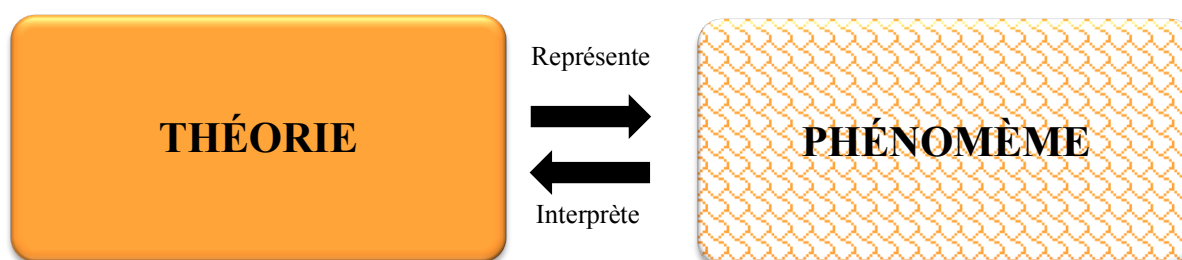


Figure 3- La théorie et le phénomène dans un rapport de nature dialectique (Robardet et Guillaud, 1997)

Les didacticiens de sciences insistent sur le rapport qu'entretient le modèle avec la réalité phénoménale à représenter. Giordan et De Vecchi (1987, p. 186) évoquent que la « réalité n'est ni transparente, ni directement accessible ; il faut la décoder, et pour cela il est nécessaire de la simplifier, en ne conservant d'elle que les éléments et les relations qui nous semblent pertinents pour chaque sujet traité ». Dans le même sens, Guichard (1994, p. 82) affirme que « la réalité ne peut jamais être appréhendée dans son ensemble et on ne considère que certains facteurs en jeu ». Ainsi, les modèles à l'échelle en tant que des répliques exactes des objets physiques ne peuvent être considérés comme des modèles scientifiques (Van Driel et Verloop, 1999). Ces propos marquent l'idée que le modèle ne doit jamais être confondu avec le référent ou, pour le dire autrement, que le modèle n'est par une simple copie du réel (Van Der Valk *et al.*, 2007, p. 471) : « Si un modèle était exactement comme son référent, il ne serait pas un modèle, mais une copie ». À ce sujet, Bachelard (1979, p. 9) considère le modèle en sciences en tant qu'opérateur sélectif de la réalité, en ce sens qu'il « représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données ou pseudo-données de l'expérience ; il sépare le pertinent du non pertinent par rapport à la problématique considérée ».

Le modèle est un instrument d'intelligibilité d'un réel dont la complexité des propriétés ne permet pas l'entière compréhension par la science : disons de façon plus explicite qu'en physique par exemple, la modélisation, par la sélection des données, par la considération exclusive de certains paramètres, par la précision d'hypothèses simplificatrices, permet la mise en œuvre de la mathématisation. Le modèle, copie du réel, serait ou trivial dans la mesure où ce réel est dominé par la connaissance scientifique, ou chimérique dans la mesure où de l'inconnu ou du mal connu subsiste. **Loin de fonctionner comme copie, le modèle fonctionne comme opérateur sélectif** (*Ibid.*, p. 9)

Cette opération de sélection, liée à la fonction de représentation du modèle, est partagée par Fouriez et Englebert-Lecomte (1999, p. 7) qui disent que « les scientifiques ne se laissent pas immerger par le monde qui les entoure : ils opèrent des sélections pour se le représenter ». En guise de conclusion, si la définition d'un modèle ne fait pas consensus chez les épistémologues, sa caractérisation en tant qu'objet simplificateur et sélectif de la réalité semble toutefois faire consensus selon Bécu-Robinault (2005) qui cite Verhaeghe *et al.*, 2004 (p. 47) : « On tend à considérer actuellement – tant en sciences de la nature qu'en sciences humaines – qu'un modèle ou une théorie (au sens général du terme) désigne une représentation structurelle d'une partie de la réalité composée d'éléments placés en relation et qui met l'accent sur l'essentiel. Un modèle est donc par définition simplificateur d'une réalité, il ne la reproduit pas. Ce qui importe c'est sa portée euristique ».

### *1.2.2 Un modèle est un outil de pensée intermédiaire entre deux mondes pour la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes*

Si les modèles occupent une place centrale en sciences, c'est notamment parce qu'ils permettent aux scientifiques de se donner une compréhension synthétique des phénomènes naturels, à un degré moins élaboré que les théories (Bachelard, 1979 ; Bailer-Jones, 2002 ; Besson, 2010 ; Bunge, 1975, 1983 ; Canguilhem, 1968 ; Damska, 1959 ; Suarez, 1999 ; Van Der Valk, Van Driel, et De Vos, 2007 ; Tiberghien, 1994 ; Walliser, 1977). Plusieurs chercheurs positionnent le modèle entre deux champs : 1) le champ empirique, constitué de l'ensemble des objets expérimentaux (protocoles, montages, appareils de mesure, etc.), des objets physiques (ex. : cellule, lumière, etc.) et des actions réalisées sur ces objets, et sur lequel le scientifique fait des observations qualitatives et quantitatives sur des phénomènes ; 2) le champ théorique constitué des concepts constitutifs d'un modèle (et par le fait même des théories) généralement reliés ou définis les uns

par rapport aux autres par des relations posées axiomatiquement, des principes, des règles, des lois et des théorèmes (Bachelard, 1979 ; Martinand, 1992, 1994 ; Orange, 1997 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Tiberghien, 1994 ; Walliser, 1977).

En d'autres mots, les modèles sont des objets intermédiaires entre deux mondes (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1975 ; Tiberghien, 1994 ; Walliser, 1977) : le monde empirique formé des objets et des événements, et le monde théorique formé des objets théoriques. Dans sa définition du modèle, Walliser (1977, p. 153) stipule que « tout modèle M, à quelque niveau qu'il se situe, peut être considéré comme un médiateur entre un champ théorique dont il est une interprétation et un champ empirique dont il est une synthèse ». Pour cet auteur, le champ théorique est constitué de l'ensemble des modèles théoriques et leurs principes logiques sous-jacents compatibles avec le modèle mobilisé, et le champ empirique est composé de l'ensemble des modèles empiriques qu'il est possible de déduire du modèle considéré et des éléments qui fondent ce modèle tels que les objets, les événements, les situations expérimentales et les connaissances en cours de construction (Bécu-Robinault, 2005). Quant à Bachelard (1979), il donne des précisions sur les relations que le modèle entretient avec d'autres objets théoriques en mettant l'accent sur l'idée que celui-ci consiste à représenter un phénomène à travers le filtre d'une théorie. Ainsi, il considère « le modèle comme rapport d'une approche théorisante à la réalité [...] le modèle n'est jamais un objet pris pour soi. Il est toujours relationnel » (*Ibid*, p. 8). Pour cet auteur, le modèle est un intermédiaire entre le concret de l'expérience et l'abstrait de la théorie : « Le modèle dans son acceptation la plus abstraite, fonctionne d'une manière ostensive, et le modèle, dans son acceptation la plus concrète de modèle visualisable, laisse transparaître la dominante théorique » (*Ibid*, p. 8). Cette conceptualisation des deux mondes traduit de manière simplifiée l'activité du physicien qui élabore des savoirs scientifiques sur les objets du monde matériel lorsqu'ils sont mis en relation avec des événements particuliers. Dans son activité, le physicien va au-delà de la simple perception des phénomènes en mobilisant des savoirs scientifiques s'inscrivant dans un paradigme (Kuhn, 1983) reconnu par sa communauté d'appartenance. Si les savoirs scientifiques relèvent des théories et des modèles, elles portent sur des objets et des événements relatifs au monde réel. En s'appuyant sur les éléments du champ théorique, le physicien est en mesure d'interpréter des phénomènes au moyen de divers formalismes mathématiques (Hulin, 1992 ; Feynman, 1980). Dans la construction de toute nouvelle théorie, les modèles font l'objet d'une validation à travers une mise en relation permanente entre

ces deux mondes que le physicien doit conserver à l'esprit (Feynman, 1980). Cette relation donne lieu à ce que nous appelons le processus de modélisation qui sera développé dans la prochaine section.

Avec les modèles, les scientifiques ont donc la possibilité de travailler sur autre chose que le réel et la théorie. De ce fait, Koponen (2007, p. 753) souligne qu'une image authentique des modèles et de la modélisation en physique nécessite la prise en compte d'un mouvement bidirectionnel dans la compréhension des phénomènes : « Les modèles sont d'abord développés pour correspondre à des phénomènes de laboratoire isolés, et les phénomènes sont ensuite associés aux modèles »<sup>41</sup>. Comme les modèles sont des objets intermédiaires entre le phénomène et la théorie, les scientifiques procèdent à leur construction en effectuant de nombreux allers-retours entre ces deux mondes. Accepter que les modèles constituent des intermédiaires entre deux mondes, c'est reconnaître que leur construction ne peut se faire que de manière inductive (du monde réel au monde théorique) ou déductive (du monde théorique au monde réel). La construction des modèles s'effectue dans le cadre d'un programme de recherche dont les orientations théoriques sont établies (Sanchez, 2008), et par conséquent, ils ne peuvent être construits que par la simple prise en compte des objets et événements relevant du monde empirique. Pour Bunge (1983, p. 34) qui pose comme fondamental la distinction entre le réel (appelé aussi monde physique) et les constructions abstraites telles que les concepts, « les hypothèses doivent s'enrichir de données pour pouvoir être testées, les théories doivent être enrichies de données et d'hypothèses ». Avec le raffinement des théories, et le recours systématique à des formalismes mathématiques, les scientifiques deviennent de plus en plus exigeants vis-à-vis des données empiriques, et de plus en plus tolérants vis-à-vis des théories (Bécu-Robinault, 2005). Dans le même sens, Hestenes (1992), en se basant sur Bunge (1983), accorde une priorité à la structure mathématique des modèles et leur subordination à la théorie dans le champ de la physique, et explique que la validité des processus de modélisation est d'autant plus grande si la construction des modèles se fait en cohérence avec les données et résultats issus des expériences de référence, d'une part, et si les modèles permettent à leur tour d'effectuer des prédictions théoriques et de confirmer la théorie au

---

<sup>41</sup> Traduction libre : « Models are developed to match with isolated laboratory phenomena, and these phenomena are fitted to models. » (Koponen, 2007, p. 753).

sein de laquelle les modèles sont construits, d'autre part. À l'instar d'Halloun (2004), nous pouvons dire que les modèles constituent des lentilles conceptuelles (conceptual lenses) à travers lesquelles les chercheurs appréhendent le réel.

Soulignons toutefois que le rapport modèle-théorie fait l'objet de nombreux débats dans la communauté scientifique. On peut relever au moins deux perspectives (Bécu-Robinault, 2005). Dans une première perspective, les modèles sont considérés en tant que constituants exclusifs d'une théorie particulière. Ils ont une portée plus ou moins locale et on leur accorde un statut de théorie si cette portée tend à l'universalité des situations. C'est le cas chez Sanmarti (2002) ou Halbwachs (1975)<sup>42</sup> qui posent des relations hiérarchiques entre les modèles et les théories, et entre les modèles au sein d'une même théorie. Dans une seconde perspective où s'inscrivent Bunge (1973) ou Walliser (1977), les modèles n'entretiennent pas de relations hiérarchiques entre eux, mais sont suffisamment flexibles pour être mis en relation avec diverses théories. Pour Bunge (1973, p. 64 ; dans Bécu-Robinault, 2005, p. 69), « un modèle n'appartient pas en propre à une théorie [...]. Un modèle donné peut toujours, moyennant certaines restrictions, être incorporé à un très grand nombre de théories ». Quant à Walliser (1977, dans Bécu-Robinault, 2005, p. 69-70), il propose une hiérarchie des modèles en distinguant quatre rapports possibles entre des modèles théoriques : 1) un *rapport d'équivalence* lorsque deux modèles théoriques permettent de représenter les mêmes modèles empiriques (ex. : les modèles d'attraction entre corps par des forces ou des champs sont équivalents) ; 2) un *rapport d'emboîtement* lorsqu'un modèle théorique représente un ensemble de modèles empiriques, que cet ensemble inclut l'ensemble des modèles empiriques du deuxième modèle théorique, et que ce deuxième modèle peut se déduire du premier (ex. : les modèles de la mécanique classique et de la relativité restreinte sont emboîtés, car la mécanique classique est une approximation de la relativité restreinte pour des vitesses faibles) ; 3) un *rapport de complémentarité* si les modèles empiriques qu'ils représentent ne sont que partiellement communs et que les modèles théoriques ne sont pas logiquement antagonistes (ex. : les modèles corpusculaires et ondulatoires de la lumière) ; 4) un *rapport de contradiction* si les modèles

---

<sup>42</sup> Rappelons Halbwachs (1975, p. 20) qui dit que : « la théorie physique apparaît ainsi comme constituée de modèles emboîtés ».

empiriques qu'ils représentent ne sont que partiellement communs, et que les modèles théoriques sont logiquement incompatibles<sup>43</sup>.

Peu importe la manière dont les auteurs différencient le modèle des autres objets de savoir mobilisés dans les démarches scientifiques, une attention accordée aux modèles impose de considérer la nécessaire articulation entre le monde réel et les outils conceptuels construits à disposition (Bécu-Robinault, 2005). En effet, Drouin (1988, p. 5) évoque que « la distinction n'est pas toujours nette entre modèle et théorie ou entre modèle et loi. Mais, quel que soit le concept auquel on s'attache, une réflexion sur modèle, loi et théorie ouvre la question du rapport entre les phénomènes de la réalité et ce qui en est dit dans le discours scientifique, entre le "réel" et le "construit" ». Elle ajoute que la mathématisation des phénomènes, comme c'est le cas en physique, donne lieu à une mise en relation entre les phénomènes et les constructions que les chercheurs peuvent faire de ceux-ci : « La mathématisation donne au modèle la possibilité de mettre en relation des paramètres, qui, mis en œuvre dans une expérimentation, susciteront de nouveaux paramètres, amenant ainsi une rectification du modèle. Il y a ainsi un balancement continu entre la formalisation et le retour au concret. Cette formalisation s'opère à travers des lois qui sont les éléments quantifiables et mathématisables du modèle » (*Ibid.*, p. 7). Ces sont ces éléments qui devraient être pris plus particulièrement en compte dans l'enseignement de la physique.

En tant qu'outil de pensée intermédiaire entre deux mondes, les principales fonctions des modèles sont la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes. La *fonction de représentation* est une fonction que partagent tous les modèles scientifiques. En effet, la compréhension des phénomènes complexes et difficilement accessibles aux élèves passe avant tout par leur représentation (Genzling et Pierrard, 1994 ; Guichard, 1994 ; Larcher, 1994, 1996 ; Williams, 2011).

Pour Genzling et Pierrard (1994, p. 67), « tous les modèles permettent de représenter la structure ou le fonctionnement d'un objet, la production d'un phénomène, l'état d'un système ». À

---

<sup>43</sup> On pourrait citer en exemple l'héliocentrisme et le géocentrisme comme modèles permettant de décrire le fonctionnement de notre système solaire.

ce sujet, Guichard (1994, p. 83) dit que le modèle constitue pour l'élève un outil qui « l'aide à se représenter ce qu'il ne voit pas » et affirme qu'en sciences le principal problème des élèves devrait être de se représenter les phénomènes à l'étude. Pour sa part, Martinand (1987) précise que les modèles permettent l'appréhension de deux aspects majeurs de la réalité : 1) Ils facilitent la représentation du "caché" en remplaçant les représentations premières par des variables, des paramètres et des relations entre variables, ils font passer à des représentations plus relationnelles et hypothétiques ; 2) Ils aident à penser le "complexe" en identifiant et manipulant de bons systèmes : ils permettent de décrire des variables d'état et d'interaction, les relations internes entre ces variables et les valeurs de contraintes extérieures.

Si la fonction de représentation constitue une fonction qu'ont en commun tous les modèles, la *fonction d'explication* est très souvent interpellée par les enseignants puisque la modélisation en classe intervient souvent en fonction d'un besoin d'explication (Astolfi et Develay, 2002 ; Genzling et Pierrard, 1994). En raison de leur nature, les modèles doivent pouvoir « symboliser un ensemble de faits, à travers une structure explicative générale que l'on peut ensuite confronter à la réalité pour voir si elle reste pertinente » (Giordan et De Vecchi, 1987, p. 186). Mais la *fonction d'explication* mérite d'être distinguée de la *fonction de représentation* comme le soulignent Astolfi, Peterfalvi et Vrin (2001, p. 97), en reprenant les propos de Wallon, insistent sur la nécessité de distinguer « le niveau de représentation stricto sensu des modèles de celui de l'explication ». Pour reprendre les propos de Genzling et Pierrard (1994, p. 69) : « expliquer un phénomène, un fait d'observation, une propriété ou une variation de propriété, c'est relier ce phénomène, ce fait d'observation, cette propriété... à un ou plusieurs descripteurs (propriétés, grandeurs physiques, etc.) du système qui fait problème ». Dans cette perspective, si le modèle constitue un outil de médiation pour cette mise en relation grâce à son pouvoir d'interprétation et aux relations sémantiques qu'il permet de construire entre le registre empirique et l'ensemble des descripteurs du système, nous dirons que le modèle présente un pouvoir explicatif.

De même pour la *fonction de description*, celle-ci est aussi distinguée de la fonction d'explication par certains auteurs comme Halloun (2007) pour qui la « description » consiste en une déclaration sur la manière dont les événements existent ou se comportent et l'« explication » consiste en une déclaration sur la raison d'être des événements ou de leur comportement. Dans le



même sens, Oh et Oh (2012, p. 1115) stipulent que « les descriptions sont des réponses à la question ontologique de ce qui existe, alors que les explications sont des réponses à la question causale de savoir pourquoi les choses se produisent »<sup>44</sup>.

Mais, c'est par la *fonction de prédiction* que plusieurs reconnaissent la puissance des modèles et que ces derniers peuvent être distingués des concepts. Pour Giordan et De Vecchi (1987, p. 186), « un modèle ne doit pas simplement clarifier un ensemble d'éléments, il doit aussi permettre de faire des prévisions. Il sera d'autant plus pertinent qu'il pourra fonctionner dans les situations les plus diverses et qu'il autorisera des prévisions avancées ». Genzling et Pierrard (1994 p. 72) soulignent le lien important entre la fonction d'explication et la fonction de prévision des modèles en disant que « si expliquer, c'est insérer dans ces possibles ce qui est réalisé, observable, prédire, ce sera faire apparaître dans ces possibles une nécessité ». Selon ces auteurs, la prédiction d'un phénomène est adéquate si nous pouvons lui faire correspondre, après coup, un observable. La fonction de prédiction permet ainsi de tester la validité du modèle.

La description, l'explication et la prédiction sont les principaux objectifs des sciences (Astolfi et Develay, 2002 ; Bachelard, 1979). C'est pourquoi plusieurs chercheurs (ex. : Boulter et Buckley, 2000 ; Gilbert, Boulter et Rutherford, 1998a, 1998b ; Halloun, 2004 ; Shen et Confrey, 2007) affirment que les principaux objectifs de la modélisation en sciences sont de décrire, expliquer et prédire certains aspects du monde naturel, et mettent en exergue l'une ou l'autre des fonctions des modèles lorsqu'ils les exposent.

À ce sujet, citons Crawford et Cullin (2004) dans leur approche des modèles qui mettent en avant le rôle central des modèles pour l'explication et la prédiction des phénomènes naturels. Selon ces auteurs, les investigations scientifiques menées par les chercheurs pour comprendre le fonctionnement des phénomènes s'opérationnalisent selon une séquence qui permet de faire des observations, d'identifier des régularités dans des données collectées, et de développer et tester des explications sur ces régularités, lesquelles sont désignées par ces auteurs comme étant des modèles

---

<sup>44</sup> Traduction libre : « descriptions are answers to the ontological question of what exists, whereas explanations are answers to the causal question of why things happen » (Oh et Oh, 2012, p. 1115).

scientifiques. En affirmant que les processus de modélisation permettent d'« investiguer des phénomènes réels du monde naturel, puis de concevoir, construire et tester des modèles informatiques associés à ces investigations du monde réel »<sup>45</sup>, Crawford et Cullin (2004, p. 1386) adoptent une approche réaliste de la science promue par certains philosophes comme Black (1962), Giere (1988, 1999) et Hesse (1963).

Pour Schwarz *et al.* (2009), les fonctions d'explication et de prédiction des phénomènes sont mises en exergue au sein d'un processus de modélisation itératif. Ces auteurs privilégient la nature générative des modèles en identifiant un lien important entre les fonctions d'explication et de prédiction des modèles. Dans un mouvement descendant, les modèles aident à produire des explications sur le comportement d'un phénomène et permettent d'établir de nouvelles prédictions en termes d'observables expérimentaux pouvant être testées à partir de nouvelles données collectées sur le phénomène. Ainsi, les prévisions sont confrontées à des mesures ou observations empiriques. En contrepartie, dans un mouvement ascendant, les analyses effectuées sur le phénomène permettent aux scientifiques d'identifier les éléments potentiels, les relations analogiques pertinentes entre le phénomène et le modèle, les règles et les opérations possibles au sein du modèle, ainsi que ses limites en fonction des choix retenus. De ce fait, les scientifiques reconfigurent le modèle de manière à ce qu'il puisse générer des explications et prédictions sur le comportement du même phénomène à l'étude. En conséquence, les modèles que les scientifiques construisent dans le cadre d'une théorie générale constituent des outils perfectibles.

Soulignons par ailleurs que la fonction de prédiction des phénomènes peut autant prendre la forme de « rétrodiction » que celle d'« extrapolation » comme le souligne Sanchez (2008). Dans le premier cas, le modèle est construit dans une intention de reconstruire un événement du passé. En recourant au modèle de la tectonique des plaques, les scientifiques peuvent expliquer la formation des continents. Dans le second cas, le modèle est construit dans le but de faire des prédictions sur le comportement futur du phénomène. C'est le cas des modèles climatiques produits par les climatologues qui visent à décrire l'évolution du climat terrestre et à faire des prédictions à

---

<sup>45</sup> Traduction libre : « investigating real-world phenomena ; then designing, building, and testing computer models related to the realworld investigation » (Crawford et Cullin, 2004, p. 1386).

différents points du globe selon les émissions de gaz carbonique annuelles dans l'atmosphère. Dans tous les cas, que les modèles soient interpellés pour leur fonction de rétrodiction ou d'extrapolation, nous pouvons affirmer que les modèles « prophétisent », comme le souligne Canguilhem (1968, p. 316).

Enfin, Justi et Gilbert (2002a, 2002b) appréhendent la modélisation scientifique comme étant la production et la révision des modèles selon un processus dynamique et non linéaire en faisant état de plusieurs fonctions des modèles en sciences qu'ils inscrivent sur un continuum de complexité. À l'extrémum gauche, ils évoquent la fonction la plus élémentaire des modèles qui est la représentation des phénomènes par des descriptions simplifiées. Au centre de ce continuum, ils mettent en évidence la fonction de rendre visibles des phénomènes complexes, abstraits ou inaccessibles par l'observation directe afin de fournir une base pour permettre l'interprétation de résultats expérimentaux et l'élaboration d'explications. Puis, à l'extrémum droit, ils rapportent des fonctions plus complexes des modèles comme la prédiction des phénomènes.

### *1.2.3 Un modèle peut être représenté par une grande diversité de registres de représentation sémiotique*

Les modèles sont nombreux et diversifiés en raison des multiples phénomènes qu'ils peuvent expliquer et peuvent être représentés par une grande diversité de registres de représentation sémiotique comme les objets matériels, les schémas, les représentations algébriques, graphiques, vectorielles, les animations, les simulations informatiques, les analogies, etc. (Bécu-Robinault, 2005 ; Boulter et Gilbert, 2000 ; Drouin, 1988 ; Gilbert et Boulter, 2000 ; Gilbert, 2004 ; Hasni, 2010 ; Halbwachs, 1974, Robardet et Guillaud, 1997 ; Walliser, 1977).

Si, dans la communauté scientifique, les scientifiques s'appuient fréquemment sur des modèles exprimés sous différents registres de représentation sémiotique pour penser, construire, reconstruire et communiquer les théories, à l'école, il y a intérêt d'exploiter différentes formes d'expression des modèles afin d'aider les élèves à visualiser et conceptualiser des idées abstraites ou des phénomènes qui ne sont pas accessibles en raison de leur trop petite (atome) ou trop grande taille (galaxie) (Williams, 2011). Ainsi, au-delà de la parole et de l'écriture, les modèles ont une

grande capacité à fournir des représentations non linguistiques afin de permettre aux élèves de s'exprimer sur des phénomènes divers. Dans ses travaux, Gilbert (Boulter et Gilbert, 2000 ; Gilbert et Boulter, 2000 ; Gilbert, 2004) évoque cinq modes de représentation pouvant être convoqués dans la représentation des modèles : 1) le *mode concret ou matériel* (« concret or material mode ») se composant de matériaux résistants et qui prennent la forme d'objets en trois dimensions, par exemple les modèles réduits comme celui d'un avion ; 2) le *mode verbal* (« verbal mode ») consistant en une description orale d'une entité ou des relations entre les objets qui la structurent ; 3) le *mode symbolique* (« symbolic mode ») comprenant les symboles, les expressions ou les formules mathématiques ; 4) le *mode visuel* (« visual mode ») faisant appel aux représentations en deux dimensions telles que les représentations graphiques, les diagrammes et les animations ; 5) le *mode gestuel* (« gestural mode ») faisant appel à l'utilisation du corps humain ou du moins à certaines de ses parties pour représenter le modèle. Selon Dori et Belcher (2005), les processus de modélisation qui favorisent davantage la compréhension conceptuelle des élèves sont ceux qui mobilisent une grande diversité de modes de représentation dans l'utilisation, l'adaptation, la révision ou la construction des modèles.

Dans leur définition des modèles, certains auteurs mettent explicitement en avant les registres de représentation sémiotique ou les systèmes de signes supportant l'expression des modèles. C'est le cas de Walliser (1977, p. 116) qui définit le modèle comme étant une représentation d'un système réel avec lequel il entretient des relations d'isomorphisme : « Dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique ». C'est aussi le cas chez Halbwachs (1974, p. 39-40) :

À toute situation physique du “monde réel”, il correspondra, dans la “science physique”, [...] un (ou plusieurs) systèmes de “signes” consistant en des figures, des graphiques, des symboles mathématiques, ou plus simplement des propositions formées avec des mots, systèmes qui seront alors censés représenter la situation. À un tel système de signes, nous donnerons le nom de modèle et nous poserons la définition : connaître une situation, c'est la représenter par un modèle.

Ainsi, la modélisation peut être appréhendée comme une activité langagière ou de sémiotisation au sein de laquelle les idées et les connaissances circulent à travers une large gamme de registres de représentation sémiotique. La compréhension des phénomènes par les élèves est

d'autant plus facilitée si des représentations multiples des modèles sont mobilisées et articulées (Adadan, Irving et Trundle, 2009 ; Ainsworth, 2008 ; Bécu-Robinault, 2005 ; Oh et Oh, 2012 ; Tsui et Treagust, 2003). Bécu-Robinault (2005, p. 57), qui stipule que « tous les modèles de la physique, scientifiques ou scolaires, s'appuient sur des représentations », se réfère aux travaux de Duval (1995)<sup>46</sup> pour postuler que les élèves donnent du sens aux modèles en s'appropriant et en articulant divers registres de représentation des concepts lors de la modélisation d'un phénomène.

Dans le cas des sciences physiques, les registres les plus fréquents sont la langue naturelle, les graphes, les schémas, les tableaux, les relations algébriques et numériques. Chacun d'eux obéit à des règles spécifiques. **Ainsi, l'apprentissage se joue à deux niveaux : tout d'abord au niveau de chacun des registres disponibles, puis dans l'articulation de ces registres.** Lorsqu'un élève est confronté à ces registres, il peut soit le traiter de manière quasi-instantanée, lorsqu'il est suffisamment familier (c'est le cas, le plus souvent, de la langue naturelle, même si dans ce cas, il est possible que l'élève fasse référence à des connaissances communes et donc attribue un sens au concept qui ne soit pas conforme à sa signification scientifique) soit le traiter de manière intentionnelle lorsque l'élève reconnaît un registre pertinent à mettre en œuvre et le mobilise dans un but précis (*Ibid.*, p. 57)

Afin d'expliquer aux élèves les lois de Kepler du mouvement planétaire, l'enseignant peut recourir à des schémas du système planétaire et des équations pour mettre en évidence les propriétés physiques des planètes. Pour autant, si les modèles peuvent être bénéfiques pour expliquer des idées scientifiques en raison de leur potentiel pour reformuler ces idées dans des formes plus facilement accessibles aux élèves, leur utilisation par les enseignants peut s'avérer problématique si elle s'inscrit dans une approche conventionnelle de transmission des modèles scientifiquement acceptés (Oh et Oh, 2012). Enfin, dans l'usage des représentations multiples, il y a un risque que le modèle soit confondu avec les modes de représentation utilisés pour représenter le modèle<sup>47</sup> (Sanchez, 2008). Mais en engageant les élèves à expliciter les modes de représentation et leur complémentarité dans la représentation du modèle, cela leur permet de différencier le modèle de ses représentations (Larcher, 1994). Ces arguments nous conduisent à dire que la mobilisation et

---

<sup>46</sup> Duval (1995, p. 36) a montré que les registres de représentation sémiotique obéissent à des règles différentes, et que le contenu porté par chacun des registres dans une situation mathématique n'est pas équivalent, en ce sens que la « propriété fondamentale des représentations sémiotiques : leur transformabilité en d'autres représentations qui conservent soit tout le contenu de la représentation initiale soit une partie seulement de ce contenu ». Il a par ailleurs mis en évidence que la compréhension d'un concept est « liée à la découverte d'une invariance entre des représentations sémiotiquement hétérogènes » (*Ibid.*, p. 61).

<sup>47</sup> La confusion entre le modèle et le registre de représentation sémiotique a d'ailleurs été observée dans notre analyse des pratiques d'enseignement. Nous y reviendrons dans la section des résultats.

l'articulation des registres de représentation sémiotique sont essentielles à la modélisation des phénomènes physiques et que les enseignants ont tout intérêt à développer les compétences des élèves à ce sujet lors des activités de modélisation mises en œuvre en classe.

#### *1.2.4 Différents modèles peuvent représenter un même référent et un même modèle peut représenter plusieurs référents*

Comme le souligne Halloun (2004 , p. 44), tout modèle présente des limites par rapport à son référent et des modèles différents sont nécessaires afin de fournir une explication plus complète de ce référent : « Quand nous avons besoin de représenter le même référent avec différents niveaux de précision, nous avons recours à différents modèles appartenant à différentes théories scientifiques s'inscrivant ou non dans le même paradigme »<sup>48</sup>. Par ailleurs, un même modèle peut aussi rendre compte de phénomènes n'ayant parfois que peu de rapports entre eux (Robardet et Guillaud, 1997). En physique, la propagation de la chaleur et le mouvement des ondes peuvent être expliqués par des modèles mathématiques identiques. Pour Drouin (1988), la « mathématisation » en physique associée à la formalisation passe parfois par l'analogie. Autrement dit, la « mathématisation » donne lieu à la construction de modèles mathématiques capables de rendre compte de phénomènes physiques distincts. Pour illustrer cet argument, nous rapportons un exemple donné par Canguilhem (1968 p. 312) lorsqu'il dit que

dans la physique mathématique, telle qu'elle s'est constituée avec les travaux de Joseph Fourier, les théories mathématiques sont prises comme objet d'étude d'où surgissent des analogies sur des terrains expérimentaux a priori sans rapport. Ces analogies apportent la preuve de la polyvalence des théories mathématiques par rapport au réel. Pour reprendre les exemples qui avaient frappé Fourier<sup>49</sup>, la propagation de la chaleur, le mouvement des ondes, la vibration des lames élastiques sont intelligibles au moyen d'équations mathématiquement identiques.

---

<sup>48</sup> Traduction libre : « When we need to represent the same pattern with different levels of precision we have to resort to different models belonging to different scientific theories within or without the same paradigm » (Halloun, 2006, p. 44)

<sup>49</sup> Jean Baptiste Joseph Fourier est un mathématicien et physicien français né le 21 mars 1768 à Auxerre et mort le 16 mai 1830 à Paris. Il est connu pour ses travaux sur la décomposition de fonctions périodiques en séries trigonométriques convergentes appelées séries de Fourier et leur application au problème de la propagation de la chaleur.

En physique cinématique, le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré permet de représenter à la fois le mouvement d'un objet matériel en chute libre et le mouvement d'un objet matériel sur un plan incliné.

Oh et Oh (2012) soulignent que la multiplicité des modèles va de pair avec la multiplicité des registres de représentation sémiotique utilisés dans leur construction. Face à cette grande diversité, Huber et Tytler (2013) soulignent un point de convergence qui est la proximité entre le modèle et la représentation : le modèle est construit comme un signe (complexe) représentant certains aspects d'un système. Selon ces auteurs, le modèle est toujours moins riche que ce qu'il représente, sans quoi il serait une copie. Par conséquent, il est toujours possible de construire des modèles distincts représentant la même chose, que ce soit pour représenter des aspects différents ou pour répondre à une autre question ou un autre objectif (Kohler et Chabloz, 2016).

### *1.2.5 Un modèle est assujetti à des révisions*

Une dernière caractéristique d'un modèle en sciences est qu'un modèle est assujetti à des révisions. Les modèles scientifiques s'inscrivent dans un processus continu d'évaluation où ils sont testés et, par conséquent, adaptés ou remplacés avec la progression des connaissances scientifiques. Gilbert *et al.* (2000) appellent les modèles consensuels (consensus models) ceux reconnus comme valides par les différents groupes sociaux, après discussion et expérimentation. Parmi ces modèles, les modèles scientifiques sont ceux qui « ont été acceptés par une communauté de scientifiques après une validation expérimentale formelle »<sup>50</sup> (Gilbert *et al.*, 2000, p. 12). Par conséquent, en classe de sciences, la modélisation ne peut être envisagée comme un processus dans lequel la construction du modèle se fait en une seule étape. Il faut davantage la considérer dans sa dimension itérative. C'est pourquoi plusieurs chercheurs proposent des processus de modélisation sous forme de cycles d'apprentissage. À ce sujet, Clement et Rea-Ramirez (2008) décrivent l'investigation scientifique comme une construction et une révision progressives d'un modèle et proposent un processus cyclique itératif pour l'apprentissage des modèles par les élèves. De même, Halloun

---

<sup>50</sup> Traduction libre : « gained acceptance by a community of scientists following formal experimental testing » (Gilbert *et al.*, 2000, p. 12).

(2004), en s'inspirant du cycle d'apprentissage de Karplus (1977), conceptualise le processus de modélisation par un cycle d'apprentissage composé de cinq phases consécutives<sup>51</sup> : l'exploration, l'adduction, la formulation, le déploiement et la synthèse paradigmatique du modèle. Ce cycle d'apprentissage de la modélisation permet aux élèves de réfléchir et d'améliorer leurs propres modèles au sein d'un processus d'évolution paradigmatique qui les conduit progressivement vers des modèles qui se rapprochent le plus possible des modèles scientifiques.

Les arguments développés précédemment nous conduisent donc à retenir, dans cette thèse, cinq attributs caractéristiques d'un modèle en sciences (**tableau 1**).

Tableau 1 : Cinq attributs caractéristiques d'un modèle en sciences

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Un modèle est une représentation simplifiée d'une entité du monde réel</li> <li>2. Un modèle est un outil de pensée intermédiaire entre deux mondes pour la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes</li> <li>3. Un modèle peut être représenté par une grande diversité de registres de représentation sémiotique</li> <li>4. Différents modèles peuvent représenter un même référent et un même modèle peut représenter plusieurs référents</li> <li>5. Un modèle est assujetti à des révisions</li> </ol> |
|---|

La définition du modèle en sciences que nous dégageons de la documentation scientifique ne permet pas distinguer le point de vue des épistémologues de celui des didacticiens de sciences. Autrement dit, sur le plan épistémologique, les caractéristiques d'un modèle construit dans la communauté scientifique correspondent pour nous à celles d'un modèle à construire en classe de sciences. Néanmoins, le niveau de complexité ou de formulation du modèle (Astolfi et Develay, 2002) pouvant être atteint varie selon le degré scolaire considéré. Cela a affaire avec le registre empirique à construire en considérant les situations matérielles à l'étude, les événements et les objets expérimentaux disponibles. Cela a aussi affaire avec le registre théorique lié aux connaissances conceptuelles que les élèves sont en mesure de construire ou de mobiliser, non

---

<sup>51</sup> Nous expliciterons un peu plus loin le cycle de modélisation développé par Halloun.



seulement en physique, mais aussi dans d'autres disciplines, plus particulièrement en mathématique<sup>52</sup>. Autrement dit, pour reprendre les pôles de Fabre (1999), les modèles que les élèves sont en mesure de construire ou de tester doivent émerger de situations problématisantes pertinentes sur les plans épistémologique, psychologique et sociologique.

## 2. LE CONCEPT DE MODÉLISATION

Nous appréhendons la modélisation sous deux angles. Le premier est un processus de mise en relation entre deux mondes (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1975 ; Martinand, 1992, 1994 ; Orange, 1997 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Tiberghien, 1994 ; Walliser, 1977) : le monde empirique qui est constitué de l'ensemble des objets expérimentaux, des objets physiques et des actions réalisées sur ces objets, et sur lequel le scientifique fait des observations qualitatives et quantitatives sur des phénomènes, et le monde théorique qui se compose des concepts constitutifs d'un modèle (et par le fait même des théories) généralement reliés ou définis les uns par rapport aux autres par des relations posées axiomatiquement, des principes, des règles, des lois et des théorèmes. Le second prend la forme d'une démarche d'investigation scientifique particulière cyclique et itérative qui s'articule autour de quatre phases dynamiques : *problématiser* ; *planifier* ; *investiguer* ; *conceptualiser et déployer*.

### 2.1 La modélisation comme processus de mise en relation entre deux mondes

En sciences, la construction des modèles s'effectue selon un processus dynamique et cyclique. Elle nécessite de nombreux allers-retours entre le champ empirique et le champ théorique. Plus précisément, elle se fait progressivement par formulation de modèles explicatifs hypothétiques élaborés dans le champ théorique à partir de modèles existants, puis par confirmation de ceux-ci à travers le champ empirique (Robardet et Guillaud, 1997 ; Walliser, 1977).

---

<sup>52</sup> À titre d'exemple, la modélisation d'objets matériels en MRUA ou en MB nécessite la mobilisation de relations mathématiques du second degré.

Les travaux fondateurs de ce processus sont ceux de Walliser (1977). Il a développé le schéma de la *dynamique de la modélisation scientifique*. Ce schéma se présente comme un cycle qui comporte quatre phases dont le point de départ est arbitraire : la phase déductive, la phase prévisionnelle, la phase de confirmation et la phase inductive (**figure 4**). Selon Walliser (1977), la *phase déductive* consiste, à partir d'une situation proposée à l'analyse, à faire dériver d'un modèle théorique initial un modèle empirique hypothétique, contenant aussi bien des variables observables que non observables, et donc susceptible d'être testé dans ses hypothèses. La *phase prévisionnelle* consiste, à partir du modèle empirique hypothétique, à imaginer des expériences permettant de le tester et de prédire des événements dans le champ empirique dans lequel le modèle peut fonctionner. Quant à la *phase de confirmation ou de description*, elle permet de construire un modèle confirmé à partir des réponses expérimentales obtenues. C'est, en particulier, la comparaison entre des valeurs calculées dans le modèle et des valeurs mesurées dans l'expérience qui fournit le test essentiel de la validation du modèle. La *phase inductive* consiste à analyser les écarts entre le modèle hypothétique et le modèle confirmé et à en induire, en tenant compte d'autres modèles empiriques, les modifications à apporter au modèle théorique préalable ou la structure d'un modèle théorique nouveau. À partir de là, une situation nouvelle, mais dans le même domaine de validité que la précédente, étant proposée à l'analyse, le cycle reprend à la phase déductive.

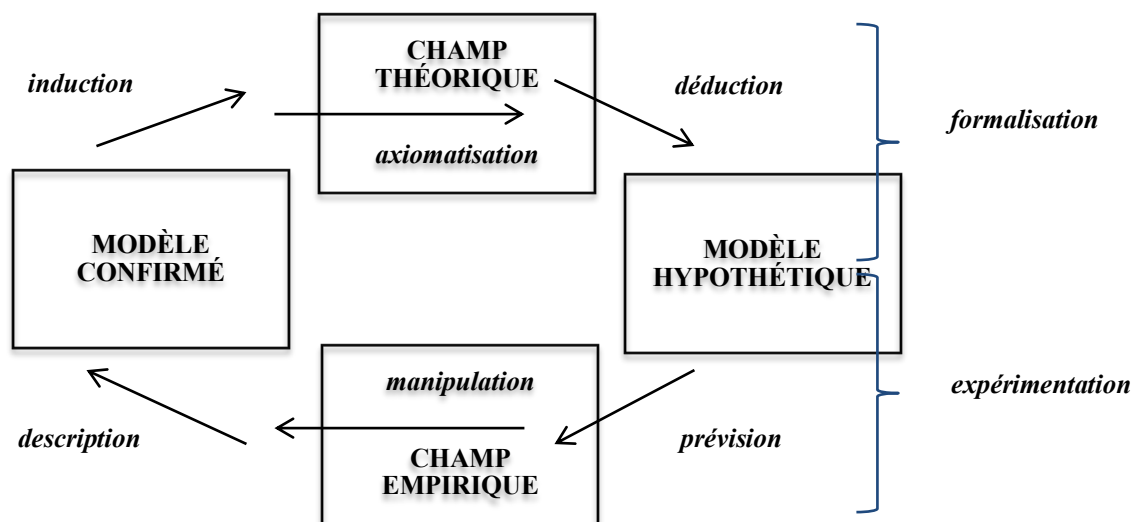


Figure 4- La dynamique de la modélisation scientifique Walliser (1977)

En s'inspirant du schéma de la dynamique de la modélisation scientifique de Walliser (1977), plusieurs didacticiens de sciences ont adapté ce processus à l'éducation scientifique, parmi lesquels

Martinand (1996), Orange (1997) et Tiberghien (1994). Ce choix s'inscrit dans la préoccupation des auteurs à rapprocher les processus de modélisation pouvant être menés en classe de sciences avec ceux menés dans la communauté scientifique. Le choix serait tout autre dans une logique de transmission des savoirs qui préconise l'explication des modèles suivie de leur application dans des contextes de résolution de problèmes, ou au mieux, dans le cadre de laboratoires dont l'objectif est de vérifier la correspondance du modèle avec le phénomène à l'étude.

Martinand (1996) définit la manière avec laquelle l'articulation entre le référent empirique et le registre des modèles se fait dans la modélisation des phénomènes, et propose sur cette base un schéma de la modélisation qui permet de distinguer le « registre du référent empirique » du « registre des modèles » ou l'« élaboration représentative » et de la « matrice cognitive » (**figure 5**). Intégrant la notion de tâche ou problème impliquant la modélisation, ce schéma met l'accent sur « les processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou en partie », et non sur « les modèles plus ou moins “arrangés” que nous pouvons leur présenter au nom de la science ou des programmes » (*Ibid.*, p. 7). Dans sa distinction entre le référent empirique et le registre des modèles qui s'appuie sur la théorie du signe de Saussure et la théorie des champs conceptuels de Vergnaud, Martinand (1996, p. 7-8) tient à préciser ce qu'est le référent empirique en stipulant que celui-ci est constitué non « seulement d'objets et de phénomènes, ou d'actions sur des objets et d'interventions sur des phénomènes. Il y a “déjà là” des descriptions, des règles d'actions, des savoirs disponibles. Ils ont un statut “empirique”, même s'ils sont l'aboutissement de processus antérieurs d'élaboration conceptuelle, théorique ou modélisante, en ce sens qu'ils sont inconsciemment projetés sur la réalité. C'est ce que nous voulons désigner avec le syntagme “réfèrent empirique” ». Dans son schéma de la modélisation, Martinand (1996) met en évidence les systèmes symboliques fournis par le modèle pour représenter, prévoir ou expliquer le référent empirique. Ce schéma permet de distinguer une description première (avant l'élaboration du modèle) pouvant être faite par les élèves, qui donnera subséquemment lieu à une construction consensuelle (phénoménographie), et une description seconde, où le modèle est mobilisé, appliqué pour rendre compte du référent empirique (phénoménologie). Cette distinction apparaît comme nécessaire au niveau du référent empirique pour souligner que les élèves n'interprètent pas spontanément les situations du monde réel avec les outils conceptuels utilisés par l'enseignant (Bécu-Robinault, 2005). Selon Larcher (2003, p. 307), la conception du processus de modélisation

véhiculée par Martinand (1996) témoigne du statut évolutif des connaissances scientifiques qui sont peu à peu intégrées au référent empirique lorsqu'un élève modélise un phénomène : « Le statut des objets de pensée manipulés change au cours du temps, en fonction des besoins momentanés et de l'expertise acquise qui restructure les théories et intègre les descripteurs ou en change de façon radicale. Ce qui est référent à un moment n'est qu'une description première, mais néanmoins partagée qui remplace la réalité qu'on ne connaît pas ». De ce fait, l'intégration progressive des connaissances scientifiques au référent empirique peut se faire en concomitance avec l'évolution des modèles élaborés progressivement par les élèves (Bécu-Robinault, 2005).

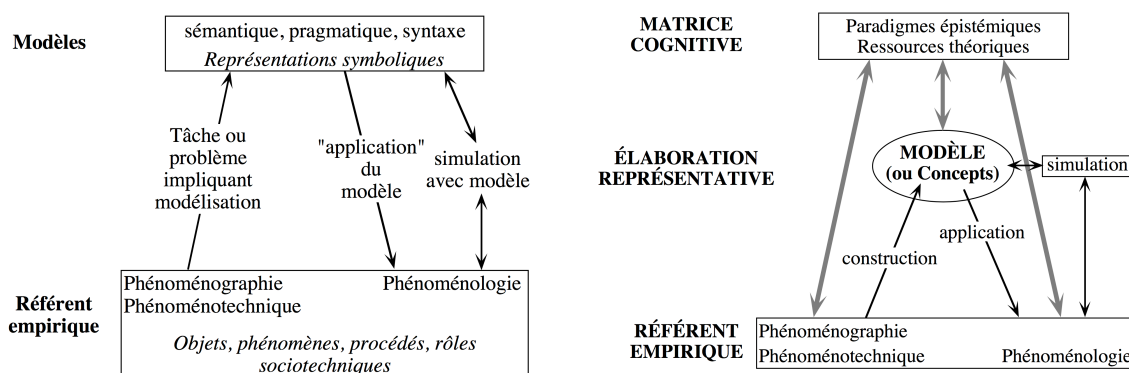


Figure 5- Articulation entre référent empirique et registre des modèles et proposition d'un schéma de la modélisation de Martinand (1996, p. 7 et 10)

Tiberghien et ses collègues (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien, Veillard, Le Maréchal, Buty et Millar, 2001 ; Tiberghien et Vince, 2005) décrivent l'activité de modélisation en physique comme une mise en relation entre deux « mondes » différents : le *monde des objets et des événements* (MOE), celui du champ expérimental des objets et événements, qui renvoie à ce qui est accessible par la perception de façon directe (observation) ou par le biais d'instruments de mesure, et le *monde des théories et des modèles* (MTM), celui des constructions théoriques, qui renvoie aux concepts généraux et aux constructions abstraites permettant d'étudier des objets et événements de la réalité empirique (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011) (**figure 6**). Cette mise en relation consiste à sélectionner et traiter les éléments théoriques correspondant aux phénomènes et objets étudiés, d'une part, et à sélectionner des objets et événements, à les décrire avec les mots de la physique ou à procéder à des expériences mesurables sur ces événements, d'autre part (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011).

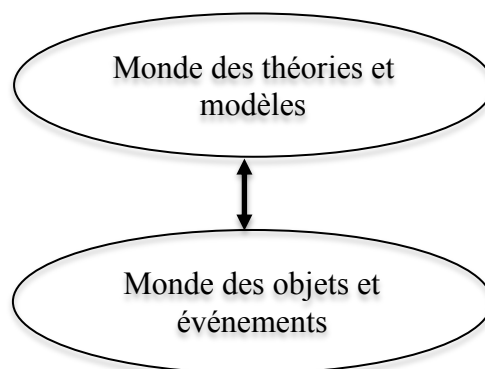


Figure 6- Distinction entre deux mondes fondée sur la modélisation en physique (Tiberghien, 1994)

Le choix d'ordre épistémologique de ces auteurs est fondé sur un aspect essentiel du fonctionnement de la physique qui place l'activité de modélisation du monde matériel au cœur de cette discipline (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1973b ; Giere, 1988, 2004 ; Hacking, 2005/1983). Ce choix est guidé par deux idées fortes, à savoir le rôle de la modélisation comme lien entre les propositions théoriques et les expériences avec comme point central l'élaboration du modèle. En s'appuyant sur Bachelard (1979) et Hacking (2005/1983), Veillard, Tiberghien et Vince (2011, p. 206) relèvent que

l'articulation entre théories et expériences ne peut se faire directement, mais nécessite l'élaboration de modèles. La construction de modèles renvoie à deux processus : l'un partant de la théorie, pour la rendre plus concrète ; l'autre partant de l'expérience pour la rendre plus abstraite. **Nous appelons modélisation ce double processus et modèle son résultat. De ce fait, un modèle est un intermédiaire entre la théorie et l'expérience et possède en quelque sorte deux facettes.**

La deuxième idée forte évoquée par Tiberghien et ses collègues concerne le point de départ du processus de modélisation. À l'instar de Hacking (2005/1983), Veillard, Tiberghien et Vince (2011, p. 205-206) soulignent que

les activités d'observation et d'expérimentation sont loin d'être toujours guidées par la théorie physique. Plusieurs exemples dans l'histoire de cette discipline montrent que des observations n'ont pas été initiées par des hypothèses théoriques, mais par des qualités de curiosité, de réflexivité des scientifiques. Elles ont de fait précédé toute formulation théorique. De ce point de vue, les moments d'observation et d'expérience sont des activités fondamentales dans toute formation scientifique et ils ne peuvent être remplacés par des descriptions écrites.

Ces propos sont en cohérence avec le caractère arbitraire du point de départ du processus de modélisation qu'évoque Walliser (1977). Si cette idée se réfère au statut accordé aux théories et à l'expérience dans la découverte scientifique et soulève certains questionnements (ex. : dans l'étude d'un phénomène, est-ce la théorie ou l'expérience qui vient en premier ?), elle a des conséquences importantes dans la construction des modèles en classe de physique, à savoir que le point de départ du processus peut être celui du MTM ou celui du MOE. Mais dans tous les cas, la modélisation ne se fait pas dans un vide conceptuel, uniquement sur la base d'observations neutres selon Bécu-Robinault (2005) qui rappelle que plusieurs épistémologues (ex. : Bachelard, 1979 ; Gooding, Pinch et Schaffer, 1989 ; Pickering, 1992) pensent que l'information que l'on peut tirer d'une expérience est toujours liée à une interprétation, et donc à la théorie ou au modèle. À ce sujet, elle cite Gooding (1989, p. 18) qui dit que « tous les faits de l'activité scientifique, même ceux enregistrés dans des cahiers de laboratoire, impliquent une reconstruction »<sup>53</sup>. Elle ajoute que ces épistémologues reconnaissent qu'il est possible d'opérer une dichotomie entre ce qui relève du champ expérimental et ce qui relève des théories et modèles.

Soulignons que le schéma développé par Tiberghien sur la base des travaux de Bachelard, distinguait initialement trois niveaux : les théories (ayant une fonction explicative), les modèles (ayant une fonction descriptive et interprétative) et les objets et événements (Coince *et al.*, 2008). Celui-ci a fait l'objet d'une modification afin de simplifier de travail de modélisation avec les enseignants du secondaire<sup>54</sup>. Le schéma a été réduit à deux mondes de manière à les rendre plus explicites pour les élèves lors des activités de modélisation. Afin de rendre compte de la place du savoir de sens commun dans la construction du savoir de la physique, Tiberghien (2000) émet l'hypothèse que lorsqu'une personne explique, interprète ou prédit des situations matérielles, il y a une activité de modélisation de ces situations. Elle suppose que les élèves, ou plus généralement les personnes dans la vie quotidienne formulent des explications ou des prédictions sur des phénomènes en s'appuyant sur leurs propres systèmes explicatifs ou cadres théoriques ; ces derniers se réfèrent aux théories naïves des élèves ou de la vie quotidienne selon certains travaux

---

<sup>53</sup> Traduction libre : « All accounts of scientific activity, even those recorded in laboratory notebooks, involve reconstruction » (Gooding 1989, p. 18).

<sup>54</sup> Lors d'un stage de doctorat que nous avons effectué avec la Pr. Andrée Tiberghien au laboratoire ICAR de l'École Normale Supérieure de Lyon, elle nous a expliqué que le schéma a été modifié du fait que les enseignants du secondaire avaient de la difficulté à distinguer la théorie du modèle.

de la psychologie cognitive (Carey, 1985 ; Vosniadou, 1994). D'un côté, les expériences de la vie quotidienne conduisent les personnes à faire des observations (ex. : la vitesse d'un train semble être beaucoup plus grande lorsque celui croise un autre train en sens inverse) ou prendre des mesures (ex. : l'indicateur de vitesse de la voiture indique une vitesse de 100 km/h) dans le MOE, et de l'autre, à formuler des idées explicatives de ces situations que nous pouvons relier au MTM. Les connaissances de la vie quotidienne entrant en jeu en fonction de la situation rencontrée et de la compréhension de l'élève du fonctionnement de la science scolaire ont alors un statut de modèle implicite (Bécu-Robinault, 2005). La théorie spécifique des deux mondes peut être utilisée à la fois pour analyser les savoirs de la physique et les connaissances issues de la vie quotidienne qui sont en jeu dans l'apprentissage de la physique. S'appuyant sur l'idée que les processus cognitifs en jeu dans la vie courante pour la compréhension du monde matériel peuvent également être appréhendés comme des processus de modélisation mettant en relation des théories plus ou moins naïves et des objets et événements, Veillard, Tiberghien et Vince (2011) proposent une nouvelle configuration de la théorie des deux mondes (**figure 7**).

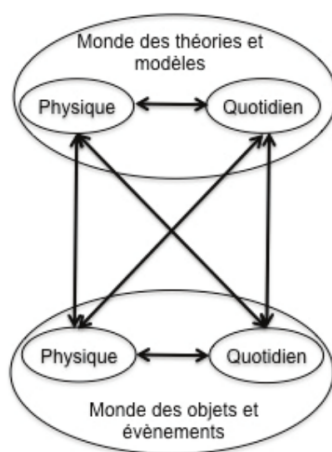


Figure 7- La théorie spécifique des deux mondes mettant en relation-tension les concepts de sens commun et les concepts scientifiques (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011, p. 207)

Ce nouveau schéma de la modélisation met en exergue les relations potentielles entre les niveaux et catégories de connaissances en jeu dans les activités d'enseignement de la physique. Il permet d'être plus attentif aux différents savoirs et aux relations que les élèves peuvent et doivent en général construire entre différents niveaux et types de connaissances, et souligne la nécessité d'amener les élèves à expliciter les contextes d'utilisation des termes utilisés (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz *et al.*, 2004). Ce schéma permet de distinguer les concepts qui relèvent de la physique de

ceux qui relèvent du sens commun. Un « freinage » en physique survient lorsque l'accélération et la vitesse sont de sens (de signe) contraire. Autrement dit, l'étude du signe du produit de la vitesse par l'accélération permet de préciser si le mouvement est accéléré ou retardé. En physique, contrairement à la réalité quotidienne, l'accélération inclut les situations où il y a décélération. Nous reviendrons sur cette distinction importante dans l'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique lorsque nous les appréhenderons à travers ce que nous appelons les « facettes de savoir » (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b).

La conception du processus de modélisation véhiculée par Tiberghien (1994) est différente et complémentaire à celle proposée par Martinand (1996) en ce sens qu'elle distingue modèle naïf et modèle scientifique. Contrairement à Martinand (1996), le monde des objets et événements ne comporte que les descriptions et les actions sur les éléments de ce monde, dans une langue scientifique ou quotidienne, mais n'intègre pas les connaissances (scientifiques ou quotidiennes) sur ces éléments. En outre, l'approche proposée par Tiberghien ne fournit pas de détails sur la manière dont les élèves développent le modèle, mais met plutôt en avant le processus d'articulation et de distinction des deux mondes auquel l'enseignant se doit de porter une attention particulière dans les activités conduites par les élèves (Bécu-Robinault, 2005).

Malgré la grande diversité des schémas et des concepts utilisés par les auteurs pour conceptualiser le processus de modélisation d'un point de vue didactique, au moins deux constats importants se dégagent.

1. Les élèves arrivent en classe de physique non pas avec l'esprit vierge, mais avec une certaine capacité à décrire des objets et des événements du monde réel dans une langue quotidienne. En poursuivant l'intention d'amener les élèves à se donner une compréhension plus approfondie des phénomènes, « les objectifs de l'enseignement [de la physique] sont d'inciter peu à peu les élèves à décrire les objets et événements dans une langue scientifique, en mobilisant des connaissances relevant des théories et modèles de la physique » (Bécu-Robinault, 2005, p. 11). Les théories de la physique étant trop complexes et non directement accessibles, la compréhension des phénomènes ne peut se faire que par une approche sélective de la réalité en recourant aux modèles considérés comme objets intermédiaires entre phénomènes et théories et comme opérateurs



sélectifs de la réalité. Si le modèle constitue « un outil pour représenter et faire fonctionner la ou les théories auxquelles il est lié » (Coince *et al.*, 2008, p. 7), et qu'il peut être considéré comme une « composante "opératoire" de la théorie », dans tous les cas, le modèle construit par les élèves en classe se doit d'être plus opératoire que leurs conceptions initiales au point de départ des situations expérimentales étudiées en classe. À la suite de Lemeignan et Weil-Barais (1988, p. 121), nous affirmons l'importance de passer d'un enseignement transmissif des modèles (où ceux-ci ont le statut de produits finis) à un enseignement « de et par » la modélisation de manière à développer chez les élèves « des représentations du monde plus opérantes que celles qu'ils ont pu construire dans leur vie quotidienne ». Dans cette seconde perspective, la modélisation devient à la fois une approche et un outil d'aide à la conceptualisation, en ce sens qu'elle favorise le passage des conceptions initiales des élèves à la construction de modèles plus scientifiques marqués par des différences significatives concernant la nature et le statut des descriptions faites par les élèves en regard des phénomènes étudiés : « Les élèves doivent passer d'une représentation des objets en jeu dans les expériences (les objets sont généralement définis par leurs propriétés et leurs fonctions), des manipulations qu'ils font (pousser, lancer, lâcher...) et des événements perçus (les objets roulent, se déplacent, de heurtent, se séparent, explosent...) à une représentation des objets traduits en termes de systèmes dont les états sont décrits par des valeurs de grandeurs physiques » (*Ibid.*, p. 124). Et ils ajoutent que « comparativement aux représentations premières des élèves qui se présentent comme un mélange de descriptions phénoménologiques et d'appel à des propriétés et à des fonctions des objets, la démarche physique consiste à ne retenir que les états qui peuvent être décrits à l'aide de grandeurs physiques reliées entre elles par une relation générale utilisée à titre de pré-supposé dans l'analyse » (*Ibid.*, p. 127). Ainsi, la modélisation mathématique constitue une activité essentielle à la compréhension des phénomènes physiques.

2. Dans la plupart des travaux sur la modélisation et dans les schémas qui en découlent, le processus de modélisation donne lieu à au moins deux mouvements principaux. Dans le premier (description et induction), la pensée va du concret vers l'abstrait (ou du Particulier vers l'Universel). Dans le second (déduction et prévision), la pensée va dans le sens contraire, c'est-à-dire de l'abstrait vers le concret (ou de l'Universel vers le Particulier) (Riopel, Raïche, Potvin, Fournier et Nonnon, 2006). Autrement dit, c'est le couplage de ces deux mouvements de la pensée qui favorise le processus de modélisation en physique. Ainsi, au-delà de la connaissance des

énoncés théoriques relatifs aux lois, principes et modèles dans le champ théorique et au-delà de la connaissance des objets (expérimentaux et physiques) et de la maîtrise des actions réalisées sur ces objets dans le champ empirique, il importe d'amener les élèves à construire des modèles en s'appuyant sur des propositions argumentées qui articulent à la fois des énoncés du champ empirique et du champ théorique. Ces deux mouvements de la pensée sont d'ailleurs évoqués dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, en ce sens que le modèle : « doit faciliter la compréhension de la réalité, expliquer certaines propriétés de ce qu'il vise à représenter et permettre la prédiction de nouveaux phénomènes observables. » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 24). Pour autant, cette articulation entre les deux mondes ne veut pas dire que le point de départ d'une modélisation est l'expérience ou la théorie. Elle permet plutôt d'attirer l'attention de l'enseignant sur deux conditions essentielles au fonctionnement du processus de modélisation qui mettent en exergue le modèle comme résultat d'un double processus entre le concret et l'abstrait. La première condition est que la modélisation de tout phénomène physique n'est possible que si l'enseignant s'assure que les élèves disposent d'un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique. Ce capital se construit progressivement par l'exploration d'objets divers de ce registre (ex. : montages, matériels de laboratoire, procédures de recueils de données, etc.) et par leur mise en relation avec des événements pertinents qui recouvrent les phénomènes physiques à l'étude, qu'ils relèvent d'expériences quotidiennes ou de situations expérimentales prototypiques menées en laboratoire. Cela veut dire que la construction du registre empirique ne peut donc se réaliser par un dispositif de formation transmissif où l'élève mémorise des résultats et des constats d'expériences décrits par l'enseignant. La seconde condition est que la modélisation n'est possible que si les élèves disposent d'un bagage théorique suffisant pour interpréter des événements avec lesquels ils sont en contact dans le registre empirique. Autrement dit, des appuis théoriques sont nécessaires à la production du modèle et à l'élaboration des faits théoriques qui découlent du modèle construit, sans quoi la modélisation s'inscrit dans une perspective empiriste des sciences. À ce sujet, rappelons que sur le plan épistémologique, les faits en sciences sont le fruit d'« une construction de la réalité et donc d'une conceptualisation du réel selon des cadres de références spécifiques » (Lebrun, Hasni et Lebeaume, 2018, p. 1) et que « la vérité ou la fausseté des faits et des savoirs qui en découlent n'a de sens que par sa référence à une théorie établie » (Hasni et Bousadra, 2018 p. 56).

Dans le processus de modélisation, il importe de ne pas confondre théorie et modèle, ces objets étant bien établis scientifiquement. Si la théorie a une valeur explicative d'observations plus larges et très diverses les unes des autres et qu'elle peut être validée par les faits, le modèle a pour sa part une valeur descriptive et interprétative pour un ensemble plus restreint de situations. C'est le cas du modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) qui permet d'interpréter et de décrire le mouvement d'un mobile en chute libre ou sur un plan incliné. Ce modèle fait partie de la théorie de la mécanique newtonienne qui a une valeur explicative plus grande puisqu'elle est constituée d'autres modèles pouvant expliquer d'autres types de mouvement comme celui des mouvements de rotation. Enfin, il ne s'agit pas pour l'enseignant ou l'élève de qualifier le modèle de juste ou non juste, mais davantage de préciser en quoi ce modèle est pertinent pour étudier les aspects retenus d'une situation expérimentale. Par conséquent, la prise en considération de la manière dont s'articulent les modèles avec les situations expérimentales est centrale dans toute activité de modélisation (Bécu-Robinault, 2005). Dans le fonctionnement du processus de modélisation, la mise en relation entre les deux mondes constitue un défi important du côté des élèves comme le soulignent de nombreux auteurs (Bécu-Robinault, 1997, 2005 ; Buty, 2000 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004).

## **2.2 La modélisation comme démarche d'investigation scientifique particulière**

Un des aspects didactiques importants à considérer dans l'enseignement des sciences est celui des démarches d'enseignement-apprentissage dans leur relation avec l'appropriation des savoirs disciplinaires (Hasni, Roy, Franc et Dumais, 2011). Malgré la diversité de ces démarches, soulignons simplement ici l'importance de distinguer celles qui s'inscrivent dans une logique de transmission et celles qui s'appuient sur des fondements constructivistes, que certains auteurs recouvrent respectivement sous les vocables de démarche de modélisation inductiviste-applicationniste et de démarche de modélisation constructiviste (Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997).

### 2.2.1 *La démarche de modélisation inductiviste-applicationniste*

Dans les démarches de modélisation inductiviste-applicationniste (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997), c'est le rôle de l'enseignant, du manuel scolaire ou de tout autre agent externe qui est privilégié dans la présentation des modèles scientifiques à faire apprendre aux élèves. En tant que détenteur du savoir, cet agent les transmet aux élèves selon des modalités diverses : explication, lecture d'un texte explicatif dans le manuel scolaire, etc. Le principal rôle des élèves est de mémoriser les savoirs qui leur sont exposés, puis de les appliquer dans le contexte de résolution de problèmes d'application qui nécessitent des opérations formelles diverses dans les registres algébriques, graphiques, vectoriels, etc. Au mieux, les élèves sont engagés dans une expérience de référence prototypique visant à exposer le modèle et faire admettre sa plausibilité en regard du phénomène étudié (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997). Dans ce cas, le rôle de l'enseignant est de présenter un problème de départ, d'introduire les faits scientifiques au préalable et de proposer aux élèves une expérience dont le protocole est déjà conçu afin qu'ils puissent vérifier la correspondance du modèle à l'étude avec les données obtenues par l'expérience. Il s'agit pour l'enseignant de soumettre aux élèves une expérience ayant non seulement une correspondance stricte avec le phénomène étudié, mais riche en matière d'introduction de faits scientifiques et de mise en relation entre ces faits. Cette expérience ne doit pas seulement montrer le phénomène : elle doit donner aux élèves « le sentiment inébranlable qu'il est là dans le domaine des faits » pour reprendre les propos de Liard (1904). À chaque étape de la démarche, l'enseignant s'appuie sur l'expérience de référence initiale pour fournir des arguments lui permettant de faire avancer la construction du modèle. Il s'agit d'abord de faire admettre la plausibilité du modèle (et de chacune des étapes d'exposition) relatif à l'expérience de référence. Une fois le modèle considéré comme plausible et admis par les élèves, il reste à le faire passer sous leur responsabilité. Ainsi, l'expérience fournie aux élèves par l'enseignant n'a pas pour but la construction du modèle, mais plutôt sa justification. Nous caractérisons une démarche de modélisation inductiviste-applicationniste par les quatre attributs suivants : a) son paradigme de référence est le scientisme où le savoir est considéré comme univoque et indiscutable ; b) les finalités de l'expérimentation sont la formulation d'hypothèses explicatives, la manipulation, l'application et la validation d'un modèle ; c) le statut conféré au modèle est celui d'un objet découlant de l'observation, un fait

préexposé à valider au sein d'une expérience non problématisée et structurée (protocole préétabli) ; d) les connaissances initiales des élèves sont en partie négligées, mais néanmoins évolutives par des « observations qui prouvent ».

Parmi les nombreuses démarches de modélisation existantes, nous nous centrerons sur la démarche de modélisation constructiviste (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997) qui engage intellectuellement les élèves dans les processus de modélisation. Nous la caractérisons par les quatre attributs suivants : a) son paradigme de référence est le rationalisme scientifique (le savoir est considéré comme artéfact, une construction théorique pouvant être débattue ; b) les finalités de l'expérimentation sont la construction d'un modèle et la mise à l'épreuve de ses limites, l'abstraction et la construction des connaissances ; c) le statut conféré au modèle est celui d'un objet intermédiaire entre le concret et la théorie, un fait à construire au sein d'une situation expérimentale problématisée et non structurée (protocole à construire) ; d) les connaissances initiales des élèves sont le point de départ d'un processus de problématisation visant à faire adopter des modèles plus valides que leurs conceptions initiales.

Notre analyse de la documentation scientifique fait état d'une grande diversité de démarches de modélisation constructivistes dont les configurations sont variables quant à leurs phases ou leurs moments forts. Cependant, elles mettent toutes en avant le caractère cyclique du processus de modélisation. Notre analyse de la documentation scientifique montre par ailleurs que les travaux de Karplus (1977) sur le cycle d'apprentissage pour l'enseignement des sciences et le développement du raisonnement scientifique des élèves<sup>55</sup> ont inspiré plusieurs chercheurs dans le développement de ces démarches. Dans le champ de la didactique des sciences, plusieurs chercheurs dans le domaine de la physique (Clement, 1989 ; Halloun, 2007 ; Hestenes, 1987, 1992 ;

---

<sup>55</sup> Le cycle d'apprentissage de Karplus (1977) s'appuie sur la théorie du développement intellectuel de Piaget et est structuré en trois phases d'enseignement : l'exploration, l'introduction et l'application des concepts. Dans la première *phase d'exploration*, les élèves sont invités à explorer une situation empirique inconnue qui « soulève des questions ou des complexités qu'ils ne peuvent résoudre avec leurs habitudes de raisonnement ... En conséquence, un déséquilibre mental se produira et les élèves seront prêts pour l'autorégulation » (Karplus, 1977, p. 174). Dans la deuxième *phase d'introduction* pour résoudre le problème en question, l'enseignant introduit un nouveau concept ou un nouveau principe. Puis, la troisième *phase d'application* est celle où « la familiarisation se fait lorsque les élèves appliquent le nouveau concept et le modèle de raisonnement à d'autres situations. » (Karplus, 1977, p. 174).

Justi et Gilbert, 2002a ; Wells *et al.*, 1995 ; White, 1993) se sont appuyés sur les travaux de Karplus pour conceptualiser des approches cycliques de modélisation.

Dans l'[annexe 1](#), nous décrivons ces diverses approches de modélisation en mettant en évidence leurs moments forts, les tâches et les rôles assumés par l'enseignant et les élèves, etc., et ce, de manière à poser les bases conceptuelles nécessaires au développement de notre propre démarche de modélisation constructiviste à la prochaine sous-section. Malgré la grande diversité des démarches de modélisation dans le domaine de la physique développées par ces auteurs, toutes engagent intellectuellement les élèves dans un processus cyclique et itératif dont la finalité est double : l'élaboration conceptuelle d'un modèle, d'une part, et l'utilisation de ce modèle afin de représenter, décrire, expliquer et prédire un phénomène physique, d'autre part. Dans la prochaine sous-section, nous développons une démarche de modélisation constructiviste cyclique et itérative en nous appuyant notamment sur les travaux présentés dans l'[annexe 1](#).

### 2.2.3 Proposition d'une démarche de modélisation constructiviste

Si les propositions des auteurs présentées dans l'[annexe 1](#) rejoignent d'assez près notre vision quant à la signification de cette démarche, de ses finalités éducatives et ses modalités d'opérationnalisation, elles ne mettent pas en exergue, du moins de manière explicite, l'importance de l'articulation entre la problématisation et la conceptualisation dans les apprentissages scientifiques. En outre, si nous ne nions pas l'importance de s'appuyer sur les pratiques sociales de référence des physiciens afin de conceptualiser une démarche de modélisation constructiviste dont les composantes mobilisées par les élèves se rapprochent le plus possible de celles mobilisées par les physiciens lorsqu'ils modélisent des phénomènes, nous pensons qu'il importe de prendre en compte d'autres aspects didactiques importants qui relèvent de l'activité d'investigation scientifique de manière générale. Afin de se donner un cadre plus englobant de la démarche de modélisation constructiviste tout en prenant en compte les spécificités de l'activité de modélisation dans le domaine de la physique, nous invoquons les construits de problématisation, de contextualisation, de conceptualisation et de démarche d'investigation scientifique. Ainsi, nous considérons la démarche de modélisation comme étant un cas particulier de la démarche d'investigation scientifique comme c'est le cas de plusieurs auteurs (ex. : Boilevin *et al.*, 2012 ;

Calmettes, 2009, 2012 ; Calmettes et Matheron, 2015a, 2015b ; Cariou, 2015 ; Gandit *et al.*, 2010 ; Grangeat, 2013 ; Hasni et Samson, 2008a, 2008b ; Hersant et Orange-Ravachol, 2015 ; Jameau et Boivelin, 2015 ; Larcher, 1994 ; Sanchez, 2008 ; Sanchez, Prieur et Fontanieu, 2007 ; Schmidt-Lainé et Pavé, 2008). Les démarches d'investigation scientifique mettent un accent fort sur la problématisation et la relation circulaire entre la problématisation<sup>56</sup> et la conceptualisation dans les apprentissages scientifiques (Beorchia, 2005 ; Boilevin, 2005 ; Fabre, 2005b, 2006 ; Hasni et Samson, 2008b ; Hersant et Orange-Ravachol, 2015 ; Lhoste, 2004, 2005, 2006, 2008 ; Orange, 2003, 2005, 2007 ; Orange, Lhoste et Orange-Ravachol, 2008). Dans la phase de problématisation, la contextualisation des savoirs disciplinaires en relation avec des situations réelles ou fictives de la vie quotidienne prend également son importance (Anciaux, Forissier et Prudent, 2013 ; Hasni, 2010a, 2011 ; Marcel, 2002 ; Orange, 2013). Dans le monde anglo-saxon, ces démarches se réfèrent à une large gamme d'« inquiry-based » comme l'« inquiry-based science » (Forbes, 2011 ; Plevyak, 2007), l'« inquiry-based instruction » (Capps et Crawford, 2013 ; Van Hook, Huziak et Nowak, 2005), l'« inquiry-based learning » l'« inquiry-based learning » (Larkin, King et Kidman, 2012 ; Wu et Wu, 2011) et l'« inquiry-based teaching » (Duran, Ballone-Duran, Haney et Beltyukova, 2009 ; Magee et Flessner, 2012) et dont le degré d'implication de l'enseignant et des élèves dans ces démarches varie sur un continuum allant de l'investigation ouverte (« open inquiry ») à l'investigation structurée (« structured inquiry ») en passant par l'investigation guidée ou confirmée (« guided or confirmation inquiry ») (Magee et Flessner, 2012). Sur la base des six cadrages conceptuels de la démarche de modélisation (Clement, 1989 ; Halloun, 2007 ; Hestenes, 1987, 1992 ; Justi et Gilbert, 2002a ; Wells *et al.*, 1995 ; White, 1993) (**annexe 1**) auxquels nous intégrons les construits de problématisation, de contextualisation, de conceptualisation et de démarche d'investigation scientifique, la **figure 8** présente de manière schématique une démarche de modélisation constructiviste cyclique et itérative<sup>57</sup> qui s'articule autour de quatre phases dynamiques : problématiser, planifier, investiguer, conceptualiser et déployer. Cette démarche sert de cadre pour analyser les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans leur diversité.

---

<sup>56</sup> Le processus de problématisation est d'ailleurs au coeur de la construction du savoir scientifique (Bachelard, 1938 ; Kuhn, 1962 ; Laudan, 1977 ; Popper, 1971).

<sup>57</sup> En raison de sa complexité, précisons que cette démarche de modélisation se veut opératoire qu'à partir de l'enseignement secondaire supérieur. Des adaptations sont nécessaires pour des niveaux d'enseignement inférieurs.

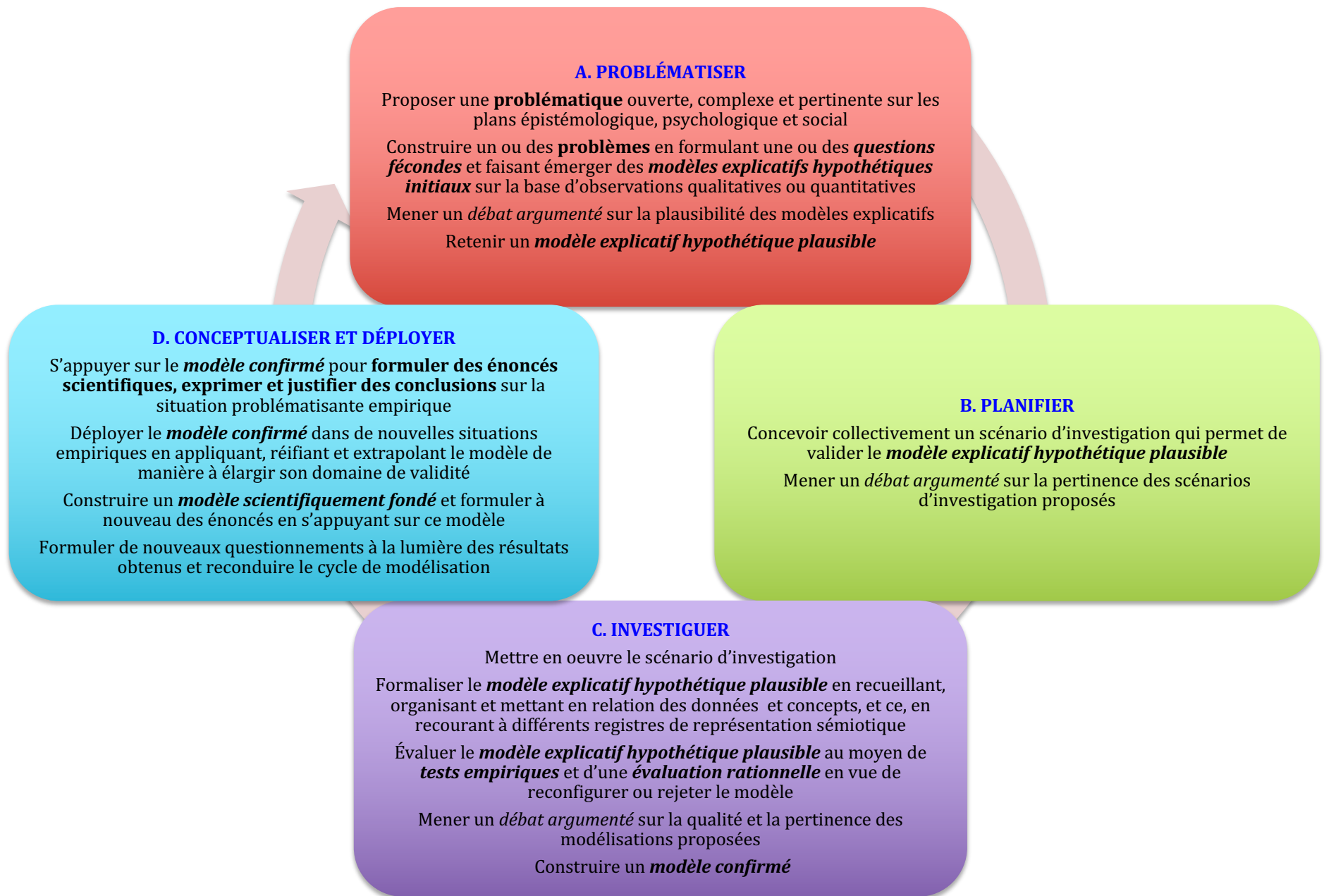


Figure 8- Une démarche de modélisation constructiviste



### 2.2.3.1 La phase Problématiser

En référence aux travaux de Fabre et Orange (1997, p. 37-38), nous concevons la problématisation comme « une construction ou une reconstruction du problème », c'est-à-dire un processus qui permet de transformer « un problème perçu en un problème construit ou, plus généralement, en un ensemble articulé de problèmes construits » (*ibid.*, p. 37-38). Plus précisément, l'arrière-plan théorique retenu pour appréhender le processus problématisation est celui de Fabre (2009, p. 272) qui s'appuie sur les travaux de G. Bachelard, J. Dewey, G. Deleuze et M. Meyer, lequel propose cinq critères pour caractériser le processus de problématisation.

Il s'agit : 1) d'un processus multidimensionnel impliquant position, construction et résolution de problèmes ; 2) ce processus opère une dialectique de références et d'inférences ; 3) d'une recherche de l'inconnu à partir du connu ; 4) d'une pensée contrôlée par des normes (intellectuelles, éthiques, techniques, pragmatiques...) qui s'avèrent tantôt prédéfinies et tantôt à construire. Ces normes servent à définir les conditions du problème et à anticiper les formes que doivent avoir les solutions ; 5) d'une schématisation fonctionnelle du réel qui renonce à tout embrasser et à reproduire la réalité, mais vise plutôt à construire des outils pour penser et agir.

Ainsi, nous partageons avec ces auteurs que « l'élève ne peut donner sens aux connaissances scientifiques qu'en les appréhendant comme solutions possibles de problématiques élaborées en classe » (*Ibid.*, 1997, p. 55) et, de manière générale, que tout savoir scientifique doit être fonctionnel.

Dans une démarche de modélisation constructiviste, comme c'est le cas d'autres démarches d'investigation scientifique, celle-ci n'est donc pas amorcée avec un problème donné aux élèves (comme ce pourrait être le cas en mathématiques), mais plutôt avec une *problématique* (Orange, 1994, 1997, 2003, 2005, 2007, 2013 ; Sgard, Jenni, Solari et Varcher, 2017) ou une *situation problématique* (Boilevin, 2005), ce que Lenoir (2004) appelle une *situation problématisante*. La problématique prend la forme d'une situation ouverte, d'un problème flou. Elle comporte des éléments déclencheurs qui permettent d'ouvrir sur un « champ des possibles » en vue de la construction d'un ou de problèmes spécifiques comme le souligne Orange (2005). Ainsi, la problématique ne doit pas être confondue avec un problème, mais elle doit conduire toutefois à la construction d'un problème. Nous retenons la définition de problématique proposée par Sgard,

Jenni, Solari et Varcher (2017, p. 44) qui consiste en « un ensemble de questionnements et d'hypothèses qui forment un système cohérent, dynamique, ouvert et stimulant dont l'ensemble est rendu cohérent par l'explicitation d'une question organisatrice, structurante ». Ces auteurs insistent sur le caractère ouvert de la problématique de manière à ce que celle-ci puisse

garantir le prolongement du processus de problématisation au fil des apports de nouvelles données et éventuellement au cours de l'investigation : on doit pouvoir revenir à la problématique pour l'enrichir, la préciser, l'infléchir. Enfin par son ouverture, la problématique doit être stimulante, c'est-à-dire susciter curiosité et motivation. La problématique permet donc de construire des liens entre les questions, la formulation de problèmes, les hypothèses à explorer, les pistes à documenter, les visées ; elle permet ainsi de délimiter un champ d'investigation, tracer les frontières et justifier ce que l'on exclut du champ (*Ibid.*, 2017, p. 44)

La problématique proposée par l'enseignant se caractérise avant tout par son aspect problématisant du fait qu'elle place les élèves dans un état initial insatisfaisant comme le souligne Fabre (1999, p. 64) : « La charge du problème obéit à la forme générale suivante : le sujet perçoit un état initial insatisfaisant, il se représente un état final plus satisfaisant, il se donne cet état pour but ». La problématique proposée engage les élèves dans l'exploration d'une situation empirique inconnue et les conduit dans un état de déséquilibre cognitif du fait qu'elle soulève, pour reprendre les propos de Karplus (1977, p. 174), « des questions ou des complexités qu'ils ne peuvent résoudre avec leurs habitudes de raisonnement ... En conséquence, un déséquilibre mental se produira et les élèves seront prêts pour l'autorégulation »<sup>58</sup>. La problématique doit permettre aux élèves de réaliser que les connaissances initiales (leurs modèles mentaux) dont ils disposent sont insuffisantes pour représenter, décrire, expliquer ou prédire le phénomène à l'étude, ou pour le dire en d'autres mots, que le modèle sous-jacent au phénomène étudié est pour le moment caché ou inaccessible à leurs sens. De ce fait, cela justifie la nécessité de construire un premier modèle de la situation (Halloun, 2007).

À la suite de Fabre, nous insistons sur le fait que cette problématique doit être pertinente sur les plans épistémologique, social et psychologique (Fabre, 1999, 2005a). Sur le plan

---

<sup>58</sup> Traduction libre : « questions or complexities that they cannot resolve with their accustomed patterns of reasoning... As a result, mental disequilibrium will occur and the students will be ready for self-regulation. » (Karplus, 1977, p. 174).

*épistémologique*, il s'agit de voir en quoi celle-ci interpelle la physique, et aussi d'autres disciplines scolaires comme les mathématiques, en tant que « structures structurantes » (Bourdieu, 1980, p. 88) qui permettent d'appréhender de manière spécifique le phénomène étudié avec leurs modes de pensée et leurs outils (initiation aux principes d'intelligibilité des disciplines). Il s'agit également de voir en quoi le traitement de cette problématique permet de « conduire à des apprentissages disciplinaires pertinents, valides et exacts » (Lebrun, 2013, p. 313). Cette référence à l'épistémologie est en cohérence avec les propos d'Astolfi (2008), qui dit qu'il n'y a pas de véritables savoirs sans accès aux paradigmes disciplinaires, chacun étant original par le fonctionnement du langage qui y prévaut et par les formes de raisonnement qui y sont valides. Elle constitue par ailleurs un critère qui permet de juger la qualité de la contextualisation de la situation sur le plan de l'articulation entre problématisation et apprentissage des savoirs disciplinaires (Hasni, 2011 ; Hasni et Roy, 2008).

Sur le *plan social*, la problématique doit faire résonnance avec la réalité de l'élève. Ainsi, la problématisation n'a pas pour objectif de problématiser des savoirs scolaires isolés, mais plutôt de conceptualiser des manières de voir le monde. Ce pôle permet de poser la question : en quoi le savoir de la situation fait-il sens pour la réalité naturelle, humaine et sociale ? Dans la théorie de l'enquête, Dewey (1993/1938) « pour éviter de verser dans une conception privilégiant l'acquisition de savoirs absorbants et décontextualisés ultérieurement appliqués à un contexte donné, avance que la connaissance se construit dans l'expérience » (dans Lenoir, 2014, p. 260-261). La prise en compte de ce pôle par l'enseignant de physique a comme conséquence de proposer une problématique qui permet d'étudier des phénomènes de la physique qui ont du sens avec les expériences quotidiennes des élèves.

Enfin, sur le *plan psychologique* qui « renvoie à la fonctionnalité du savoir pour le sujet qui s'interroge » (Lebrun, 2013, p. 314), la problématique doit être accessible psychologiquement aux élèves. Comme le souligne Fabre (1999, p. 75), le problème revêt une fonction d'expression « dans la mesure où il vise à enrôler l'élève dans l'apprentissage. On parlera alors selon les cas d'intérêt, de motivation ou de dévolution ». Si nous admettons comme Brousseau, Balacheff, Cooper et Sutherland (1998) que la dévolution du problème consiste à faire en sorte que le problème de l'enseignant devienne celui de l'élève, les élèves doivent avoir un minimum de connaissances afin

d'être en mesure de le percevoir. À cet égard, la problématique doit être conçue de manière à prendre en compte l'état des connaissances des élèves sur le sujet. Comme le soulignent Hasni, Roy, Franc et Dumais (2011, p. 9), le problème scientifique « ne peut naître spontanément d'un contact immédiat avec une situation, même soigneusement choisie. Celui-ci ne peut pas émerger d'un vide conceptuel ». Si l'absence de savoirs nécessaires à la compréhension du problème peut rendre l'obstacle infranchissable pour les élèves, à l'inverse, la maîtrise de tous les savoirs en jeu peut rendre la formulation du problème inutile (*Ibid.*, p. 9). Si la compréhension de la problématique peut nécessiter de la part de l'enseignant l'introduction d'un nouveau savoir, dans tous les cas, elle doit se situer dans la zone proximale de développement (ZPD) (Vygotski, 1997) des élèves, et mobiliser ainsi des savoirs disciplinaires appropriés à leur niveau scolaire.

Une fois la problématique proposée par l'enseignant, le travail de celui-ci consiste à engager les élèves dans la construction d'un *problème* (Boilevin, 2005 ; Dewey, 1993/1938 ; Fabre, 1999, 2005a, 2005b, 2006, Fabre et Orange, 1997 ; Orange, 1994, 1997, 2003, 2005, 2007, 2013). Comme le souligne Dewey (1993/1938), c'est en raison de l'état initial insatisfaisant posé par une problématique que les élèves seront motivés à se mettre « en quête », et que, par conséquent, on passera de la problématique au problème lors de l'enquête. Et il ajoute que la situation initiale proposée est « indéterminée tant que le sujet la subit. Mais dès qu'il entreprend de la redresser, de la réorganiser, de la rediriger, la situation devient “douteuse” ou “problématique” [...] La situation indéterminée devient *problématique* : elle pose un problème précis. » (*Ibid.*, p. 27). Ainsi, les démarches de modélisation qui s'appuient sur des fondements constructivistes, lorsqu'elles sont prises en charge par les élèves, ne peuvent se réduire au traitement d'une thématique ou d'une question à débattre en classe, même si cette dernière est soigneusement choisie par l'enseignant. Elles ne peuvent pas non plus se réduire à la résolution de problèmes d'application proposés ou formulés par des acteurs autres que les élèves eux-mêmes (ex. : enseignants, concepteurs des manuels, vulgarisateurs, etc.). Ces démarches doivent avant tout amener les élèves à construire des problèmes pertinents, à problématiser, avant de proposer et de mettre en œuvre des manières appropriées de les résoudre (Astolfi, Darot, Ginsburger-Vogel et Toussaint, 1997 ; Fabre, 1999 ; Hasni et Samson, 2008b) Comme le soulignent Astolfi *et al.* (1997, p. 81) : « le problème... doit être construit avec la classe en cours d'activité. Car l'activité scientifique ne revient pas seulement à résoudre des problèmes..., mais elle consiste d'abord à apprendre à les poser ». Ces arguments nous conduisent à affirmer que la proposition d'une problématique par l'enseignant pour amener

les élèves dans un état de déséquilibre cognitif est une condition nécessaire, mais non suffisante pour problématiser un phénomène quelconque de la physique.

Dans la phase de problématisation, les élèves sont appelés à analyser une problématique en explorant le « champ des possibles » (Orange, 2005), à cerner un ou des problèmes scientifiques et à formuler une ou des questions de recherche. Soulignons cependant que si la problématisation peut conduire à la formulation de plusieurs questions fécondes<sup>59</sup> en relation avec le phénomène à étudier, ce ne sont pas nécessairement toutes les questions qui doivent faire l'objet d'un traitement par les élèves. En raison du temps à disposition et des ressources matérielles et humaines disponibles, les élèves peuvent prioriser le traitement de certaines d'entre elles.

Une fois la ou les questions de recherche formulées, celles-ci doivent maintenant faire l'objet d'une investigation, mais cette dernière ne peut être réalisée à l'aveuglette sans une formulation préalable d'hypothèses en relation avec les questions de recherche. Les hypothèses sont les ponts qui relient les questions fécondes aux moyens envisagés. À ce sujet, Dewey (1993/1938, p. 75) disait que si la suggestion « plus ou moins spéculative, aventureuse » est le cœur même de l'exercice de la pensée, l'hypothèse est le « facteur central » de la réflexion (*Ibid.*, p. 6), et « ne pas encourager la fécondité et la souplesse dans la formation des hypothèses [...] est plus proche de la mort garantie de la science que de n'importe quoi d'autre. » (*Ibid.*, p. 508). Dans le cas d'une démarche de modélisation, les hypothèses<sup>60</sup> prennent plus particulièrement la forme d'un *modèle explicatif hypothétique initial* en vue de rendre compte du phénomène à l'étude par les différentes fonctions qui les sous-tendent : la représentation, la description, l'explication et la prédiction. Le moment de la problématisation où les élèves sont appelés à formuler un *modèle explicatif hypothétique* correspond à la *phase déductive du modèle* proposé par Walliser (1977) qui consiste, à partir d'une situation proposée à l'analyse, à faire dériver un modèle empirique hypothétique,

---

<sup>59</sup> Par questions fécondes, nous entendons des questions en relation avec la problématique qui peuvent déboucher sur des hypothèses plausibles et conduire à des explications ou des modélisations du phénomène à l'étude dans la phase de conceptualisation.

<sup>60</sup> Les hypothèses peuvent se présenter essentiellement sous deux formes selon la nature de l'investigation envisagée (Cariou, 2015). Si l'investigation est de *nature explicative* du fait qu'elle est centrée sur la recherche d'explications d'un phénomène et qu'elle sollicite des questions comme : comment expliquer ? Comment s'effectue ? Comment fonctionne ? les hypothèses seront qualifiées d'*hypothèses explicatives*. Si l'investigation est de *nature pragmatique* du fait qu'elle est centrée sur la recherche de moyens ou d'actions concrètes et qu'elle sollicite des questions comme : comment faire pour ? Quelles actions à entreprendre ? les hypothèses seront qualifiées de *moyens hypothétiques*.

contenant aussi bien des variables observables que non observables, et donc susceptible d'être testées dans ses hypothèses.

Dans la première phase de construction du problème, les élèves sont d'abord appelés à formuler des *modèles explicatifs hypothétiques initiaux* d'un phénomène en s'appuyant sur des observations qualitatives ou quantitatives et sur des analogies issues de leurs expériences quotidiennes ou de situations empiriques prototypiques, et ce, en mettant en relation différents concepts. Ces observations les conduisent à la *description du modèle* où les objets et les propriétés du phénomène impliqué dans la situation empirique sont identifiés et modélisés, c'est-à-dire représentés mathématiquement (Hestenes, 1987). L'étape de description consiste à décrire le phénomène par des variables descriptives d'objet, de mouvement et d'interaction. Cette description nécessite la mobilisation de registres de représentation sémiotique divers, parmi lesquels les tableaux, les graphiques, les cartes de mouvement, les diagrammes de corps libres, les diagrammes de force, etc.

Ces *modèles explicatifs hypothétiques initiaux*, qui se réfèrent à ce que Halloun (2007) désigne par les *modèles nominaux*, constituent en quelque sorte les premières représentations conjecturales des élèves quant à la structure ou au processus implicite sous-jacent au phénomène étudié (Clement, 1989). Soulignons à nouveau que ces modèles se présentent avant tout sous la forme de *modèles mentaux* propres à chacun des élèves, c'est-à-dire sous la forme de représentations mentales individuelles du fonctionnement du phénomène physique à l'étude comme nous l'avons souligné précédemment. Selon le physicien Hestenes (2007, 2010), les modèles mentaux associés à un phénomène physique se présentent sous la forme d'une structure cognitive qui s'articule autour de deux structures : une structure physique faisant référence à une intuition physique et qui relève des objets et des événements du monde réel et une structure mathématique faisant référence à une intuition mathématique et qui relève des représentations symboliques (**figure 9**). Les *modèles explicatifs hypothétiques initiaux* que les élèves construisent à l'égard d'un phénomène sont accessibles à la classe sous la forme d'un modèle matérialisé (ou un modèle conceptuel) au moment où l'enseignant les sollicite à faire part de leurs conceptions.

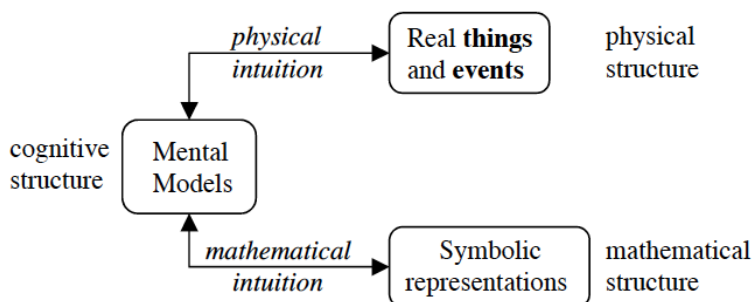


Figure 9- Structure cognitive d'un modèle mental d'un phénomène physique (Hestenes, 2010, p. 10)

Dans la seconde phase de construction du problème, les élèves sont appelés à comparer, sur la base de leur viabilité, les différents *modèles explicatifs hypothétiques initiaux* formulés précédemment, à éliminer ceux qu'ils considèrent comme non plausibles et à faire émerger parmi ceux-ci un *modèle explicatif hypothétique plausible* qui porte tous les éléments viables de ses prédécesseurs. Ce moment, qui se réfère à l'*adduction du modèle* (Halloun, 2007), vise à amener à se concentrer sur un seul modèle plausible parmi plusieurs modèles candidats plausibles. Le *modèle explicatif hypothétique plausible* peut encore comporter certains éléments résiduels non pertinents que les élèves ne peuvent pas entièrement résoudre à ce stade, mais qui seront éliminés dans les phases subséquentes (Halloun, 2007).

Dans cette phase de problématisation, les interactions entre l'enseignant et les élèves ne doivent pas s'inscrire dans une posture directive et univoque, mais plutôt dans une posture interactive et dialogique. Ainsi, le rôle de l'enseignant ne consiste pas à exposer directement aux élèves des modèles explicatifs du phénomène à l'étude, mais plutôt à encourager les élèves à formuler ou reformuler leurs propres modèles explicatifs initiaux de la situation et à questionner leur adéquation avec le phénomène étudié. Dans la seconde phase de construction du problème, l'enseignant peut diriger délibérément l'interaction des élèves de manière à ce qu'ils puissent retenir un modèle hypothétique unique qui a un degré de viabilité relativement élevé et un faible degré de naïveté par rapport à leurs modèles explicatifs initiaux (Halloun, 2007). Son rôle est aussi de les accompagner afin qu'ils puissent construire, en bénéficiant d'interventions ciblées et constructives, les données et conditions du problème. Au besoin, l'enseignant réajuste le tir en introduisant de nouveaux matériaux pour problématiser, indique des ressources à consulter et

apporte des clarifications sur les éléments fournis. Dans cette phase de problématisation, l'enseignant peut mener un débat argumenté sur la recevabilité des modèles hypothétiques initiaux et du *modèle explicatif hypothétique plausible* proposés par les élèves. Ce débat conduit sous la responsabilité de l'enseignant agissant comme modérateur a pour objectif de mettre en évidence les conceptions alternatives des élèves et d'apporter les éclairages nécessaires à la progression des élèves dans le processus de problématisation. Sans intervention de la part de l'enseignant dans ce processus, le risque est grand que la problématisation se réduise à un moment d'échanges sur des éléments superficiels de la problématique.

### 2.2.3.2 La phase Planifier

Une fois le *modèle explicatif hypothétique plausible* retenu, il s'agit d'engager collectivement les élèves dans la conception d'un scénario d'investigation qui permettra de recueillir les données nécessaires à la validation du *modèle explicatif hypothétique plausible* formulé dans la phase de problématisation. La phase de planification correspond à la *phase prévisionnelle* du modèle proposée par Walliser (1977) qui consiste, à partir du modèle empirique hypothétique, à imaginer des expériences permettant de le tester et de prédire des événements dans le champ empirique. Cette phase requiert de la part des élèves la planification des modalités de recueil des données de manière à pouvoir mettre en œuvre l'investigation proprement dite dans la phase subséquente. La conception du scénario d'investigation prend en compte la disponibilité en ressources matérielles et la faisabilité procédurale relativement à la conduite de l'enquête, laquelle peut se concrétiser aussi bien par une expérience menée en classe ou sur le terrain, mais qui, dans tous les cas, devra impliquer les élèves dans des observations dans le monde réel et dans la réalisation de recueils de données empiriques (Halloun, 2007). Dans cette phase, le rôle de l'enseignant consiste à initier et accompagner les élèves dans la sélection de *procédures d'investigation* et de *ressources* (matérielles, humaines, naturelles, etc.) appropriées. Il consiste aussi à s'assurer que les élèves proposent un scénario suffisamment solide pour tester le *modèle explicatif hypothétique plausible* provisoire, et à proposer au besoin des pistes pour améliorer le protocole (Halloun, 2007).

Si dans une démarche de modélisation constructiviste, ce sont les élèves qui décident d'eux-mêmes du matériel et du protocole à utiliser pour la construction de leur modèle, un *débat argumenté* peut toutefois être mené sur la pertinence des scénarios d'investigation envisagés.



Cette phase transitoire importante entre la phase de problématisation et la phase d'investigation est souvent escamotée dans l'enseignement pour des raisons d'ordre psychologique (ex. : l'enseignant pense que les élèves sont incapables de concevoir un scénario d'investigation et précipite les élèves à investiguer parce qu'ils sont motivés) ou d'ordre didactique (ex. : l'enseignant ne dispose pas suffisamment de temps pour couvrir son programme).

### 2.2.3.3 La phase Investiguer

La phase d'investigation consiste en la mise à l'épreuve du scénario d'investigation en vue de répondre au problème posé et aux questions de recherche retenues. Il s'agit plus particulièrement de recourir aux procédures d'investigation qui ont été planifiées au préalable afin de reconfigurer ou de rejeter le *modèle explicatif hypothétique plausible* formulé dans la phase de problématisation.

La phase d'investigation nécessite dans un premier temps la *formulation du modèle explicatif hypothétique plausible* qui consiste à mettre en relation les objets et les propriétés avec des lois appropriées de manière à formuler un modèle mathématique abstrait, et ce, sur la base des objets et propriétés du phénomène qui ont été identifiés par la description du modèle dans la phase de problématisation. La formulation du modèle conduit les élèves à recueillir et organiser des données en recourant à des registres de représentation sémiotique variés (représentations tabulaires, algébriques, graphiques, vectorielles, etc.) (Hestenes, 1987), à exploiter diverses ressources matérielles (matériel de laboratoire, logiciels de modélisation, livres de référence, etc.), à analyser des données en identifiant des régularités et les interpréter en regard des questions de recherche retenues. En physique cinématique, la formulation du modèle peut consister au passage des données tabulaires ou graphiques d'un mouvement rectiligne uniformément accéléré aux équations mathématiques de ce mouvement.

La phase d'investigation nécessite dans un second temps l'*évaluation du modèle explicatif hypothétique plausible*. Cette évaluation peut se réaliser de deux manières, soit au moyen de *tests empiriques* permettant de confirmer ou de réfuter le modèle sur la base de données empiriques, soit au moyen d'une *évaluation rationnelle* permettant de confirmer ou de réfuter le modèle sur la base de sa compatibilité avec des théories clairement établies (Clement, 1989). Quant à l'évaluation empirique, elle peut consister en une simple évaluation numérique au terme de la résolution d'un

problème ou en la mise en place d'une nouvelle expérimentation afin de tester le modèle ou encore en une comparaison de modèles alternatifs pour représenter les données empiriques d'une même situation afin de déterminer lequel est le plus pertinent pour représenter ces données (Hestenes, 1987). Si le *modèle explicatif hypothétique plausible* est évalué positivement, on lui attribue le statut de *modèle confirmé*. S'il est évalué négativement dans l'une ou l'autre des deux formes d'évaluation, il peut être amélioré au lieu d'être complètement rejeté (Clement, 1989). Ce faisant, tout modèle explicatif hypothétique plausible fera l'objet d'une série de modifications et de raffinements successifs à l'intérieur de cycles répétés de tests rationnels et empiriques.

Un double processus de mise en relation entre le MOE et le MTM est nécessaire afin de reconfigurer ou rejeter le *modèle explicatif hypothétique plausible*. En d'autres mots, la construction du *modèle confirmé* s'effectue de manière bidirectionnelle par des observations qualitatives et quantitatives sur le phénomène dans le référent empirique et par des appuis sur des ressources théoriques du référent théorique. Elle implique donc deux mouvements distincts (Hestenes, 1992 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Schwarz *et al.*, 2009 ; Walliser, 1977) : 1) un *mouvement ascendant* consistant à confronter des mesures ou observations empiriques au modèle explicatif hypothétique plausible, à produire des explications sur le comportement du phénomène et à établir des prédictions en termes d'observables expérimentaux pouvant être testées à partir de nouvelles données collectées sur le phénomène ; 2) un *mouvement descendant* consistant à analyser le phénomène à l'étude en identifiant des éléments potentiels, des relations analogiques pertinentes entre le phénomène et le modèle et des règles opératoires possibles au sein du modèle.

Au terme de la phase d'investigation, les élèves peuvent être appelés à évaluer leur *modèle confirmé* en le confrontant à leur modèle explicatif hypothétique initial ou aux *modèles confirmés* produits par leurs pairs. Ainsi, un *débat argumenté* sur la qualité et la pertinence des modélisations proposées par les élèves peut être mené. Soulignons que la formulation du modèle n'est pas simple, car elle demande aux élèves une grande compétence à effectuer des conversions entre des registres de représentation sémiotique, notamment entre les registres graphiques et algébriques ou vectoriels. Ce défi a d'ailleurs été relevé par Duval (1995) qui considère la tâche cognitive en jeu dans un cadre théorique piagétien et pour laquelle il s'agit pour l'élève de réussir à coordonner divers registres sémiotiques (Kohler et Chablotz, 2016). En effet, « Duval propose un “modèle opératoire

de la représentation” (1995, p. 65) basé sur les travaux de Bresson, permettant une description des systèmes complexes que sont les modèles. Cette approche permet de mettre en évidence qu’il est nécessaire, pour enseigner au sujet d’un référent non perceptible (comme c’est souvent le cas en physique), d’utiliser au moins deux registres sémiotiques différents et de les coordonner ensemble. » (Kohler et Chabloz, 2016, p. 9-10). Par ailleurs, la formalisation du modèle peut nécessiter la mobilisation de ressources théoriques inconnues des élèves. À cet égard, l’enseignant peut introduire par exemple de nouvelles lois pour compléter la structure du modèle si celles proposées par les élèves sont insuffisantes ou il peut les accompagner afin que ceux-ci puissent formuler ces lois par extrapolation rationnelle des lois formulées préalablement, qu’il s’agisse de lois génériques ou spécifiques (Halloun, 2007). La phase d’investigation du modèle correspond à deux phases de modélisation identifiées par Walliser (1977) : 1) la *phase de description du modèle* consistant à construire un *modèle confirmé* en comparant entre les données expérimentales mesurées dans l’expérience avec celles fournies par le modèle explicatif hypothétique ; 2) la *phase inductive* du modèle proposé consistant, à analyser les écarts entre le *modèle explicatif hypothétique* et le *modèle confirmé* et à en induire, en tenant compte d’autres modèles empiriques, les modifications à apporter au modèle théorique préalable ou la structure d’un modèle théorique nouveau.

#### 2.2.3.4 La phase Conceptualiser et déployer

La phase de conceptualisation marque la fin de l’enquête avec comme objectif d’accorder au *modèle confirmé* le statut de *modèle scientifiquement fondé* sur la base des résultats de l’enquête. Il s’agit de passer de la « situation indéterminée » à la « situation déterminée » pour reprendre les propos de Dewey (1993/1938, p. 32) : « Si l’enquête commence dans le doute, elle s’achève par l’institution de conditions qui suppriment le besoin du doute. Quand le problème est résolu, la situation est si déterminée en ses distinctions et relations constitutives qu’elle convertit les éléments de la situation originelle en un tout unifié. La situation unifiée marque la fin de l’enquête ». Et Dewey (1993/1938, p. 35) ajoute que cette phase s’accompagne de la construction de nouveaux savoirs sur la situation, lesquels résultent de la mise en œuvre des procédures d’investigation : « La connaissance est la fin de l’enquête, elle est toujours vraie, jamais immédiate, elle est la relation des moyens (méthodes) employés et des conditions atteintes à titre de conséquences de ces moyens ». Le *modèle confirmé*, c’est-à-dire celui qui permet de rendre compte le mieux possible

le phénomène à l'étude, est utilisé afin de produire une solution plausible au problème de départ. Il s'agit pour les élèves de s'appuyer sur ce modèle afin de formuler des énoncés scientifiques, d'exprimer et de justifier des conclusions sur la situation empirique à l'étude.

Mais le *modèle confirmé* ne peut obtenir le statut de *modèle scientifiquement fondé* que s'il permet de représenter, décrire, expliquer et prédire la structure ou le comportement d'autres situations empiriques. Il s'agit alors pour l'enseignant de proposer aux élèves de nouvelles situations empiriques afin que ces derniers soient en mesure de *déployer le modèle* construit dans d'autres contextes, et ce, de manière à élargir le domaine de validité du modèle. Ce faisant, les élèves sont appelés à mettre au point leur modèle quant à ses objets et aux relations analogiques qu'il entretient avec les phénomènes à modéliser, et ce, à travers différentes activités de modélisation telles que l'application, la réification et l'extrapolation du modèle. Dès lors, le déploiement du modèle conduit à un nouveau moment de conceptualisation par la formulation de nouveaux énoncés scientifiques, l'expression ou la justification de nouvelles conclusions sur les situations empiriques proposées par l'enseignant. À partir de là, de nouveaux questionnements peuvent être soulevés à la lumière des résultats obtenus et peuvent conduire à l'introduction d'une nouvelle problématique, ce qui conduit à reprendre le processus de problématisation. C'est en ce sens que la démarche de modélisation constructiviste est cyclique et itérative.

Contrairement à la démarche de modélisation inductiviste où le modèle est présenté au début de la démarche, dans la démarche de modélisation constructiviste, le modèle résulte de l'aboutissement de la démarche. Une idée essentielle à retenir est que la démarche de modélisation aboutit à une conceptualisation qui est double : elle permet non seulement l'élaboration conceptuelle d'un modèle associé au phénomène physique à l'étude, mais aussi la formulation d'énoncés scientifiques (de faits scientifiques) qui s'appuient sur ce modèle afin de représenter, décrire, expliquer et prédire le phénomène en question. La démarche de modélisation constructiviste met donc en relation de manière étroite la problématisation et la conceptualisation du modèle. Ces propos sont cohérents avec l'idée du processus de construction des problèmes qui consiste en un double dédoublement pour Dewey (1993/1938, p. 183), notamment le premier

dédoublément<sup>61</sup> entre les faits et les idées que celui-ci décrit de la façon suivante lors de la transformation, par l'enquête, d'une situation indéterminée en une situation unifiée pour laquelle deux opérations sont nécessaires, « l'une a un objet idéal ou conceptuel. Cet objet représente des moyens et des fins possibles de solution [...] l'autre est faite d'activités impliquant les techniques et les organes de l'observation ». En ce qui concerne ce premier dédoublement, qualifié de deédoublément des faits et de la théorie par G. Bachelard, au moins deux remarques peuvent être faites (Lhoste, 2017, p. 60-61) : 1) C'est à partir d'une situation indéterminée ou situation problématique que s'opère ce premier dédoublement ; 2) Idées explicatives, théories et faits sont toujours en liens, les faits ne sont pas indépendants de la théorie et réciproquement. Dewey (1993/1938, p. 174) affirma que « l'observation des faits et la suggestion des significations ou idées naissent et se développent en corrélation » alors que Bachelard, (1998/1949, p. 3) affirma : « pas de rationalité à vide, pas d'emprise décousue ». Pour Meyer, comme c'est le cas chez Bachelard, et Dewey, tout est construit, les faits comme les théories. Dans cette configuration, l'argumentation n'est pas seulement du ressort de l'enseignant, puisqu'elle interpelle l'enseignant et les élèves autour de modèles explicatifs hypothétiques contradictoires. La construction d'un modèle par les élèves est grandement facilitée par le passage d'un discours expositif pris en charge par l'enseignant à un discours interactif entre l'enseignant et les élèves.

Si nous sommes conscients que les deux démarches de modélisation (inductiviste et constructiviste) que nous avons présentées constituent des modélisations pouvant être réductrices du large spectre des configurations réelles des pratiques d'enseignement de la modélisation, elles ont toutefois l'avantage de présenter une structure de référence suffisamment claire pour situer ou délimiter les finalités éducatives et les modalités d'opérationnalisation possibles d'une démarche de modélisation en classe de physique. Ainsi, si ces fondements théoriques et didactiques sont retenus pour comprendre la manière dont les enseignants conçoivent et mettent en œuvre les modèles et la modélisation dans leur enseignement de la physique, nous restons toutefois attentifs à d'autres logiques possibles qui émergeront de la description de leurs façons de voir et de mettre en œuvre cet enseignement.

---

<sup>61</sup> Le premier dédoublement évoqué par Dewey peut être relié à la dialectique de références et d'inférences, soit la 2<sup>e</sup> caractéristique du processus de problématisation soulevée par Fabre (2009) que nous avons évoquée précédemment.

### 3. LA MODÉLISATION DANS LE CONTEXTE DE LA CINÉMATIQUE DU POINT MATÉRIEL : LES CONCEPTS FONDAMENTAUX

Dans notre étude, le domaine de validité lié à la construction des modèles s'inscrit à l'intérieur de la théorie de la mécanique newtonienne. Nous caractérisons les pratiques d'enseignement en mettant la focale sur la modélisation des phénomènes du point de vue du savoir qui relève de la cinématique. L'apprentissage du domaine de la cinématique est particulièrement important pour les élèves, car les changements de mouvement des objets matériels dans la réalité sont très fréquents. L'étude du domaine de la cinématique permet aux élèves de mieux comprendre la nature des mouvements des corps qui se produisent aux échelles microscopique et macroscopique (Hecht, 2000). Dans le corps humain, chaque atome est en agitation permanente. La Terre tourne sur elle-même et décrit une orbite autour du Soleil, qui se déplace lui-même autour du centre de notre galaxie. L'univers est dans son ensemble en expansion. Ainsi, tout est en mouvement. Quand un événement a lieu, il y a nécessairement un changement, et ce changement implique un mouvement. L'idée de mouvement qui occupe la pensée humaine depuis des millénaires est fondamentale. Nous nous intéressons à la manière dont les enseignants proposent aux élèves de modéliser le mouvement d'objets matériels dans différentes situations (fictives, expérimentales ou autres) sans prendre nécessairement en considération les causes de leur mouvement, ce qui est l'objet de la dynamique. Plus précisément, nous nous limitons à la cinématique du point matériel<sup>62</sup>, dont l'objet d'étude est la modélisation du mouvement des objets dans des référentiels divers en recourant à des variables, que nous qualifions de variables du mouvement telles que la position, le déplacement, la vitesse et l'accélération. Sur la base de plusieurs ouvrages scientifiques portant sur la physique mécanique (Alonso et Finn, 1986 ; Gibaud et Henry, 1999 ; Hecht, 2000 ; Kane et Sternheim, 1986 ; Mercier, 1945 ; Pérez, 1989 ; Serway et Boisvert, 1992), nous développons la cinématique du point matériel autour de trois concepts fondamentaux : le point matériel, le référentiel qui met en relation un repère d'espace et de temps, et les variables du mouvement qui permettent de modéliser mathématiquement le mouvement des objets matériels.

---

<sup>62</sup> La cinématique du point matériel est un sous-domaine de la cinématique, restreinte au seul point matériel, qui est elle-même une branche de la mécanique.

### 3.1 Le point matériel

Sur le plan mathématique, les objets matériels à l'étude prennent la forme de solides géométriques constitués d'une infinité de points dans l'espace. L'étude du mouvement des objets dans le cadre de la cinématique du point matériel permet de réduire l'objet matériel à un point géométrique particulier, appelé *point matériel*, comme le centre de gravité (ou d'inertie) qui joue notamment un rôle important en dynamique. Dans ce cadre, il y a donc un premier niveau de modélisation qui consiste à s'abstraire de la forme géométrique d'un objet. Cette simplification s'avère pertinente dans le cas où les dimensions de l'objet sont relativement petites par rapport à la distance parcourue par celui-ci dans l'espace au cours de son mouvement. Elle permet de réduire la complexité des mouvements dans l'espace comme celui d'un ballon de football suivant une trajectoire parabolique tout en étant constamment en rotation. En effet, la modélisation de la position de ce ballon dans l'espace peut s'approximer par une trajectoire parabolique ou elliptique qui représente l'ensemble des points matériels « position » correspondant au centre d'inertie du ballon à tout instant.

### 3.2 Le référentiel

Parmi les idées les plus fondamentales du domaine de la cinématique à faire acquérir aux élèves, nous relevons le caractère relatif du mouvement (celui-ci n'est pas absolu !) L'étude du mouvement d'un objet matériel que nous réduisons à point matériel implique la présence simultanée de ce point et d'un observateur qui analyse l'évolution de son mouvement à partir d'une position spécifique dans l'espace. Selon la position qu'occupe cet observateur par rapport à l'objet, les résultats de son analyse du mouvement de l'objet sont très variables. À titre d'exemple, dans un TGV qui se déplace à vitesse constante, un passager qui lâche verticalement ses clés peut décrire le mouvement de celles-ci par un mouvement rectiligne. Or, une personne qui est sur le quai et observe la chute de ces mêmes clés observera plutôt un mouvement pouvant être décrit par une parabole (**figure 10**).

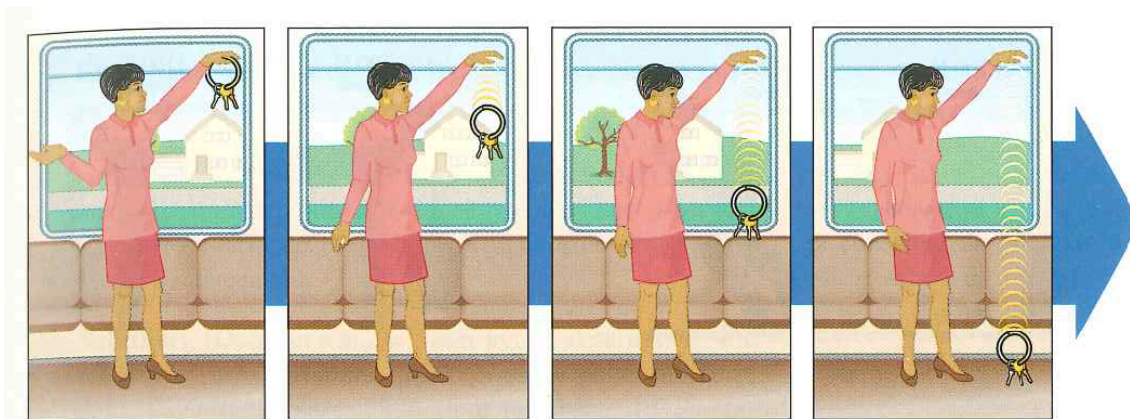


Figure 10- Description du mouvement de clés qui tombent par des observateurs situés dans des deux référentiels distincts (Hecht, 2000, p. 121)

Ainsi, la description du mouvement est liée à l'observateur, et se fait donc par rapport à une référence : le TGV dans le premier cas et le quai dans le second cas. Pour déterminer la nature du mouvement de tout objet matériel, il faut donc connaître la position du point matériel référant à cet objet au cours du temps en vue de répondre à deux questions : où se trouve le point et quand est-il passé à cette position ? La prise de conscience du caractère relatif du mouvement doit conduire l'enseignant et les élèves définir le concept de *référentiel* en tant que construit mettant en relation les concepts d'espace et de temps. Un *référentiel*, appelé aussi *solide de référence* (ensemble de points fixes entre eux), consiste en un corps matériel, réel ou imaginaire, par hypothèse considéré comme immobile, et auquel sont associés un repère d'espace, c'est-à-dire un système de coordonnées lié rigidement au solide de référence permettant de déterminer les positions successives d'un point matériel étudié, et un repère de temps, ce que les physiciens désignent également par l'« horloge »<sup>63</sup>.

En physique, les référentiels pouvant être considérés pour la description du mouvement des objets matériels sont nombreux : le *référentiel de Copernic* (où l'origine est le centre du système solaire et les axes sont dirigés vers les étoiles situées dans les directions fixes par rapport au Soleil) ; le *référentiel géocentrique* (où l'origine est le centre de la Terre et les axes sont dirigés parallèlement à ceux du référentiel de Copernic) ; le *référentiel galiléen* dans lequel un objet

<sup>63</sup> L'écoulement du temps ne pouvant pas être contrôlé, il faut une succession d'événements temporels.



matériel isolé (qui n'est soumis à aucune force) suit un mouvement rectiligne uniforme ; le *référentiel terrestre*, appelé aussi le *référentiel du laboratoire* (où l'origine est un point de surface de la Terre et les axes sont fixés par rapport à la Terre) ; etc. Ce dernier est lié rigidement à la Terre, et est entraîné par celle-ci lors de sa rotation et de la révolution autour de Soleil. Dans le référentiel terrestre, un objet matériel « immobile » est considéré comme fixe. Dans les situations expérimentales usuelles proposées dans les laboratoires de physique au secondaire, nous pouvons considérer le référentiel terrestre en tant que référentiel galiléen. En effet, dans le cas de la chute libre, il est nécessaire d'avoir une chute libre dont la hauteur initiale de l'objet matériel est considérable pour mettre en évidence sa déviation vers l'Est due à la rotation terrestre. Ainsi, nous pouvons considérer en première approximation le référentiel terrestre comme galiléen lorsque les durées considérées dans les expériences sont très inférieures à la période de rotation de la Terre. Peu importe le référentiel considéré, nous pouvons dire qu'un objet est en mouvement par rapport à un autre lorsque sa position par rapport à un autre change en fonction du temps. Par contre, si cette position relative ne change pas en fonction du temps, l'objet est au repos relatif. Le repos et le mouvement sont donc tous les deux des concepts relatifs : ils dépendent de la situation de l'objet par rapport au corps qui sert de référence. En conséquence, nous pouvons affirmer qu'une maison est un objet au repos dans le référentiel terrestre, mais qu'elle est en mouvement dans le référentiel de Copernic et le référentiel géocentrique.

Pour pouvoir répondre à la question du *quand* ?, il faut ajouter un repère de temps, c'est-à-dire la variable *temps* qui est continue, croissante et irréversible. Dans la théorie de la mécanique newtonienne, nous faisons le postulat que le temps est absolu, c'est-à-dire qu'il est identique dans tous les référentiels<sup>64</sup>, et que celui-ci s'écoule de la même manière dans des référentiels en mouvement par rapport aux autres. Ainsi, deux horloges associées à deux référentiels différents auront la même marche, c'est-à-dire que le temps s'écoulera à la même vitesse dans chacun de ces référentiels. Le temps est mesuré au moyen d'une horloge à partir d'une origine des temps fixée

---

<sup>64</sup> Ce principe d'universalité du temps n'est plus applicable dans le cadre de la mécanique relativiste laquelle est utilisée dès que la vitesse  $v$  d'un objet avoisine celle de la célérité  $c$  de la lumière dans le vide.

par l'observateur et d'une durée unitaire fixant la chronologie. Ainsi, à chaque instant, on associe un nombre réel appelé date qui correspond à la durée écoulée depuis l'instant d'origine (**figure 11**).

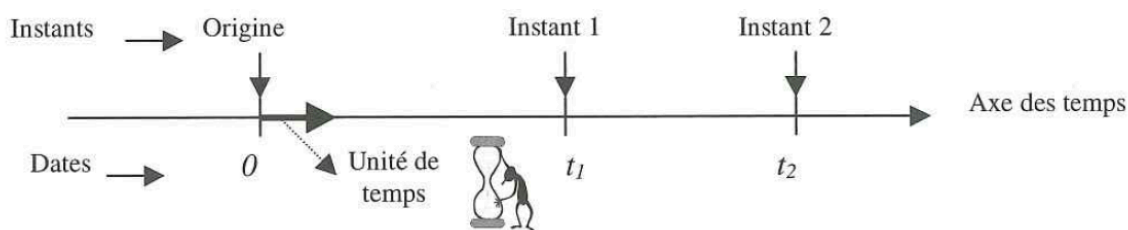


Figure 11- Repère de temps illustrant la durée entre deux instants 1 et 2 correspondant à la différence de leur date  $t_2 - t_1$  (Gibaud et Henry, 1999, p. 3)

Afin de caractériser un référentiel, nous convenons de le représenter par le symbole  $R$  associé à un repère d'espace et de temps. Ainsi, un référentiel dans un espace à trois dimensions se note  $R(O, x, y, z, t)$ , où  $O$  est l'origine,  $x, y, z$  sont les axes du référentiel et  $t$  désigne le temps. De manière à étudier le mouvement des objets matériels dans ce référentiel, il est nécessaire de choisir une *base correspondante*, ou pour le dire autrement, un *système de coordonnées mathématiques* approprié. Ainsi, les grandeurs physiques associées à un point matériel  $M$  dans un référentiel peuvent être exprimées au moyen de *coordonnées cartésiennes, cylindriques ou sphériques*. Dans l'enseignement secondaire, c'est le référentiel galiléen qui est généralement retenu en raison de son niveau de complexité approprié. C'est également celui qui fait l'objet d'étude dans le cours de mathématiques à ce même degré d'enseignement. Ce référentiel est défini à l'aide d'une base orthogonale (au sens de la géométrie de l'espace-temps) de deux ou trois vecteurs orthonormés d'espace (repère cartésien, repère orthonormé)<sup>65</sup> et d'un marqueur du temps. Cette base permet de définir les coordonnées espace-temps d'un objet matériel en mouvement par rapport à un observateur réel ou imaginaire considéré immobile par rapport à l'objet matériel observé. Dans le référentiel galiléen, la position d'un point matériel  $M$  et les grandeurs vectorielles comme le vecteur vitesse et le vecteur accélération de ce point sont exprimées avec les coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  avec la base  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  qui est une base dont les vecteurs sont fixes dans le repère. C'est donc

<sup>65</sup> Dans l'enseignement secondaire au Québec, la description des mouvements se fait dans des référentiels à deux dimensions.

l'association de l'origine du repère d'espace, des axes du repère d'espace et de la chronologie qui permet de définir le *référentiel d'étude* (figure 12).

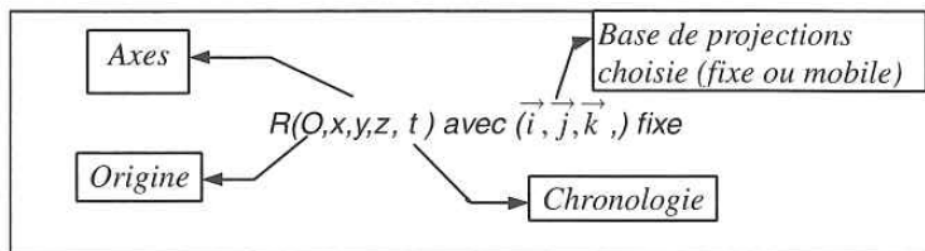


Figure 12- Référentiel d'étude (Gibaud et Henry, 1999, p. 4)

### 3.3 Les variables permettant de modéliser mathématiquement le mouvement des objets matériels

Une fois les concepts de point matériel et de référentiel définis, il s'agit de définir quatre variables fondamentales à partir desquelles les élèves peuvent s'appuyer pour modéliser le mouvement des objets matériels dans l'espace : la position, la trajectoire, le déplacement, la vitesse et l'accélération. Ces variables sont des grandeurs physiques permettant de quantifier, plus spécifiquement, de modéliser mathématiquement le comportement des phénomènes physiques à l'étude. Nous définissons la *position* d'un point matériel M dans un référentiel galiléen en nous appuyant sur ses coordonnées cartésiennes  $(x, y, z)$  dans la base orthogonale  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  et sur un marqueur du temps  $t$ . Dans un espace à trois dimensions, nous utilisons un quadruplet de nombres, trois coordonnées d'espace et une coordonnée de temps, afin d'exprimer la *position* de cet objet par rapport à l'origine du référentiel R. Ainsi, la position sera exprimée par  $M(\vec{x}\vec{i}, \vec{y}\vec{j}, \vec{z}\vec{k}, t)$ . La notation mathématique du vecteur position du point M à un temps  $t$  correspond à la combinaison linéaire de trois vecteurs unitaires  $\overrightarrow{OM} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$ .

À partir du concept de position, nous définissons la *trajectoire* d'un objet matériel entre les points  $M(t)$  et  $M'(t)$  comme l'ensemble des points  $(\vec{x}\vec{i}, \vec{y}\vec{j}, \vec{z}\vec{k})$  parcourus par cet objet entre les temps  $t$  et  $\Delta t$ .

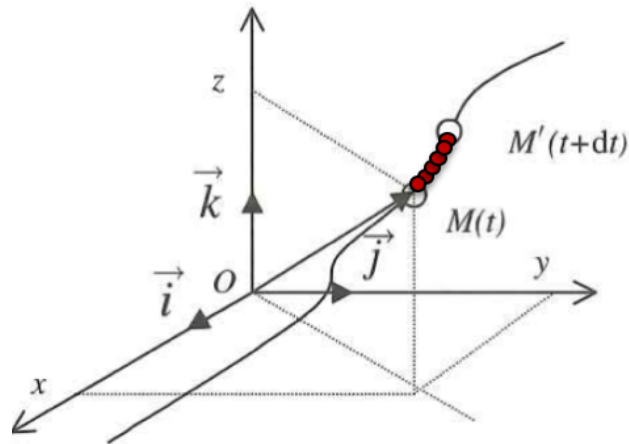


Figure 13- Trajectoire d'un point matériel entre les points  $M$  et  $M'$  dans le référentiel  $R$  (adaptation de Gibaud et Henry, 1999, p. 5)

Dans ce même référentiel, le *déplacement* correspond à la différence vectorielle entre le vecteur position finale et le vecteur position initiale sur la période de temps considérée :

$\overrightarrow{OM}_{\Delta t} = \overrightarrow{OM'}_{(t+\Delta t)} - \overrightarrow{OM}_{\Delta t}$ . Le déplacement d'un point matériel est indépendant de sa trajectoire.

La notation mathématique du vecteur déplacement correspond à la combinaison linéaire des trois vecteurs unitaires suivants :

$$\overrightarrow{OM}_{\Delta t} = (x_2\vec{i} + y_2\vec{j} + z_2\vec{k}) - (x_1\vec{i} + y_1\vec{j} + z_1\vec{k}) = (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j} + (z_2 - z_1)\vec{k}$$

Dans la **figure 14** est représenté le déplacement du point matériel  $M$  au point  $M'$  dans le référentiel  $R$ .

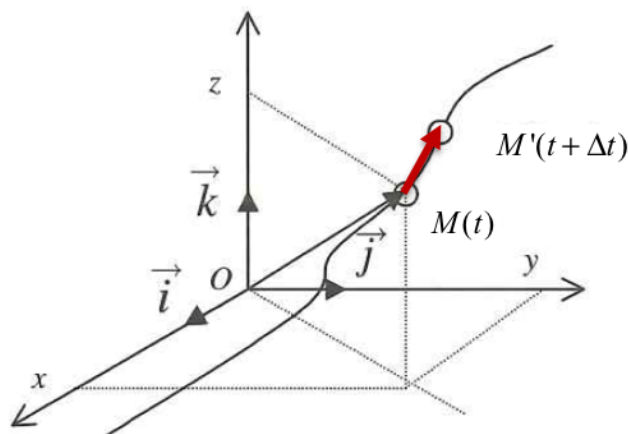


Figure 14- Déplacement du point matériel  $M$  au point  $M'$  dans le référentiel  $R$  (adaptation de Gibaud et Henry, 1999, p. 5)

Pour ce qui est de la *vitesse*, il importe de distinguer la vitesse scalaire de la vitesse vectorielle. La *vitesse scalaire*, qui se réfère au module de la vitesse, est basée sur la notion de distance parcourue indépendamment de la direction du mouvement alors que la *vitesse vectorielle* est basée sur le déplacement dans l'espace en tenant compte de la direction du mouvement. Cette dernière est définie au moyen du vecteur vitesse. Considérant un point matériel M mobile dans un référentiel  $R(O, x, y, z, t)$  avec  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  fixe, la vitesse vectorielle du point M dans le référentiel R correspond à la dérivée première du vecteur position  $\overrightarrow{OM}$  du point M par rapport au temps :

$$v_{M/R} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$$

Les vecteurs  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  étant constants, la dérivée du vecteur position conduit à la dérivée de chacune des composantes vectorielles :

$$v_{M/R} = \frac{dx}{dt}\vec{i} + \frac{dy}{dt}\vec{j} + \frac{dz}{dt}\vec{k}$$

. Si la notion de différentielle est appropriée pour l'enseignement supérieur (postobligatoire : cégep et université), les élèves du secondaire peuvent approcher cette notion au moyen de la variation, c'est-à-dire le delta qui s'exprime par le symbole  $\Delta$ . Dans l'enseignement secondaire, les opérations sur les vecteurs déplacement se font généralement dans des référentiels à une ou deux dimensions. Dans un référentiel à une dimension établi au moyen d'un axe, celui de l'axe des abscisses par exemple, le déplacement est exprimé par une grandeur numérique (positive ou négative selon le sens du déplacement). Dans un référentiel à deux dimensions, le déplacement est exprimé par un vecteur. Nous distinguons par ailleurs entre la *vitesse vectorielle moyenne* qui correspond au déplacement de l'objet sur la période de temps mis pour parcourir ce déplacement, et la *vitesse vectorielle instantanée* qui correspond à la limite du vecteur *vitesse vectorielle moyenne* lorsque l'intervalle de temps considéré tend vers 0. Autrement dit, le vecteur *vitesse vectorielle instantanée* est obtenu par la dérivée première du vecteur position en fonction du temps. Géométriquement, la *vitesse vectorielle instantanée* d'un objet matériel au point M est un vecteur tangent à la courbe en ce point et la *vitesse scalaire instantanée* est obtenue par le taux de variation de ce vecteur en considérant des points très rapprochés.

Enfin, quant à l'accélération, nous distinguons, comme c'est le cas pour la vitesse,

l'accélération scalaire de l'accélération vectorielle. L'*accélération scalaire*, qui se réfère au module de l'accélération, est basée sur la notion de variation de la vitesse indépendamment de la direction du mouvement alors que l'*accélération vectorielle* est basée sur la variation de la vitesse dans l'espace en tenant compte de la direction du mouvement. Cette dernière est définie au moyen du vecteur accélération. L'accélération du point M dans le référentiel R correspond à la dérivée première du vecteur vitesse par rapport au temps ou encore à la dérivée seconde du vecteur position

$\vec{a}_{M/R} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\vec{OM}}{dt} \right) = \frac{d^2\vec{OM}}{dt^2}$  du point M par rapport au temps : . Au niveau secondaire, nous approchons l'accélération avec l'idée de variation de la vitesse, et nous distinguons l'*accélération vectorielle moyenne*, qui correspond à la variation de la vitesse de l'objet sur une période de temps fixée, et l'*accélération vectorielle instantanée*, qui correspond à la limite du vecteur *accélération vectorielle moyenne* lorsque l'intervalle de temps considéré tend vers 0. Autrement dit, le vecteur *accélération vectorielle instantanée* est obtenu par la dérivée première du vecteur vitesse par rapport au temps. Géométriquement, l'*accélération vectorielle instantanée* d'un objet matériel au point M est un vecteur tangent à la courbe de la vitesse en ce point et l'*accélération scalaire instantanée* est obtenue par le taux de variation de ce vecteur en considérant des points très rapprochés.

#### 4. LA CINÉMATIQUE COMME DOMAINE RICHE POUR LA CONSTRUCTION DE MODÈLES ET L'ACQUISITION DE SAVOIRS CONCEPTUELS

L'étude du domaine de la cinématique doit engager les élèves dans des situations expérimentales pertinentes leur permettant de modéliser des phénomènes physiques au moyen de divers modèles du mouvement. Les types de mouvement sont nombreux en physique : rectilignes (uniforme, uniformément accéléré), sinusoïdal, circulaire uniforme, hélicoïdal, parabolique, etc. Parmi ces mouvements, ce sont le mouvement rectiligne uniforme et uniformément varié ainsi que le mouvement balistique (appelé aussi parabolique) qui sont à l'étude en raison de leur niveau de complexité approprié pour ce degré d'enseignement.

## 4.1 Le mouvement rectiligne uniforme

Une première gamme de phénomènes physiques pouvant être étudiés sont ceux associés au modèle du mouvement rectiligne uniforme (MRU). D'après la première loi d'inertie formulée par Newton en 1687 dans son ouvrage *Principia*, qualifiée par plusieurs comme étant la première loi fondamentale de la Nature, *tout corps reste immobile ou conserve un mouvement rectiligne et uniforme aussi longtemps qu'aucune force extérieure ne vienne modifier son état*. Autrement dit, si aucune force ne s'exerce sur un objet matériel (l'objet est isolé), ou si la somme des forces s'exerçant sur celui-ci est nulle (l'objet est pseudo-isolé), alors son mouvement dans un référentiel galiléen sera à la fois rectiligne et uniforme. La loi d'inertie permet d'établir une relation biunivoque entre le repos et le mouvement uniforme. Si l'un ou l'autre de ces états est établi, il persiste toujours en l'absence de forces, et pour modifier l'un ou l'autre, une force est nécessaire. Ainsi, le « repos » et le mouvement ne peuvent être distingués que « relativement » selon Newton. La loi d'inertie est une loi idéale. Nulle part dans l'Univers un objet matériel ne peut être libéré complètement d'influences externes. L'idée de mouvement sur une ligne droite infinie n'est pas réaliste, dans un cosmos en expansion comportant un nombre très grand de galaxies.

Le mouvement d'un objet matériel est rectiligne uniforme si le vecteur vitesse associé à son mouvement est constant. Le vecteur vitesse étant constant, le mouvement est rectiligne, car le vecteur vitesse est tangent à la trajectoire. Nous pouvons représenter la vitesse dans un mouvement rectiligne par un vecteur dont la norme est donnée par la dérivée première de la position par rapport au temps et dont la direction coïncide avec celle du mouvement. L'accélération peut également être représentée par un vecteur dont la norme est donnée par la dérivée première de la vitesse par rapport au temps dans la direction OX ou à l'opposé suivant qu'elle est positive ou négative. Comme la vitesse est constante, le vecteur accélération est le vecteur nul.

Dans un espace à une dimension, la droite sur laquelle le point modélisant un objet matériel se déplace est assimilée à l'axe des  $x$  et l'équation mathématique horaire de la position de cet objet

sur cet axe est donnée par la formule :  $x = Ct + x_0$ <sup>66</sup>. Étant donné que, dans un mouvement rectiligne uniforme, la vitesse est toujours constante et qu'il n'y a pas d'accélération, nous établissons une seconde équation mathématique horaire de la position par la formule :  $x = x_0 + v(t - t_0)$ . Les représentations graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniforme sont données dans la **figure 15**.

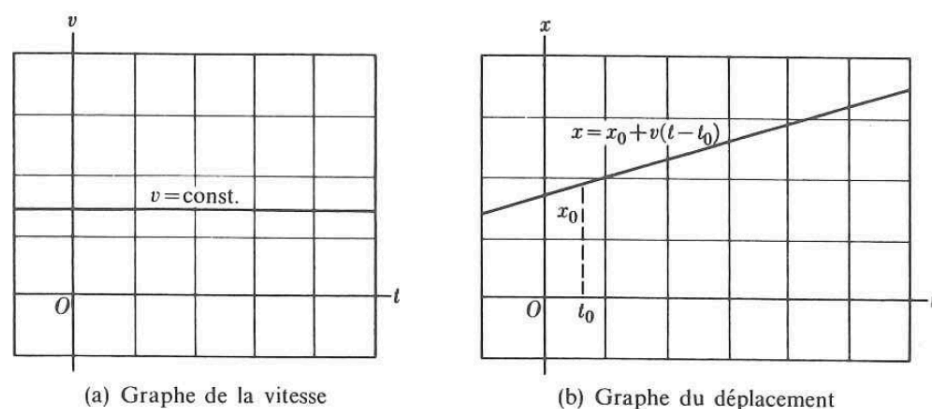


Figure 15- Graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniforme (Alonso et Finn, 1986, p. 81)

La propagation de la lumière est un exemple de phénomène suivant un mouvement rectiligne (en ligne droite) et uniforme, c'est-à-dire dont la vitesse est constante dans tout milieu transparent homogène, en particulier le vide ou l'air très sec. En laboratoire, une rondelle se déplaçant horizontalement sur une table à coussin d'air sans force appliquée subit un MRU. Dans un mouvement balistique, la composante horizontale du mouvement est aussi un MRU si l'on néglige le frottement de l'air.

## 4.2 Le mouvement rectiligne non uniforme

D'autres phénomènes sont associés au mouvement rectiligne non uniforme. C'est le cas des phénomènes impliquant le mouvement d'objets matériels dont la résultante des forces appliquées

---

<sup>66</sup> C est une constante.



sur ceux-ci est non nulle. D'après la deuxième loi de Newton, si la masse de cet objet matériel est constante, son accélération dans un référentiel galiléen est proportionnelle à la résultante des forces qu'il subit, et inversement proportionnelle à sa masse. Parmi les mouvements rectilignes non uniformes pouvant être abordés avec les élèves du secondaire figure le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Ce mouvement se produit lorsque la force résultante appliquée sur un objet matériel est constante. Autrement dit, un objet matériel sera en mouvement rectiligne uniformément accéléré si son vecteur accélération est constant et sa trajectoire est rectiligne. Dans un espace à une dimension, la droite sur laquelle le point modélisant un objet matériel qui se déplace est assimilée à l'axe des  $x$  et l'équation mathématique horaire de sa position sur cet axe est

donnée par la formule :  $x = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + x_0$ . L'étude du signe du produit de la vitesse par l'accélération permet de préciser si le mouvement est accéléré ou retardé. En outre, le fait que le vecteur accélération soit constant ne suffit pas pour dire que le mouvement est rectiligne. Il faut que la direction du vecteur vitesse soit la même que celle du vecteur accélération. Étant donné que l'accélération est constante dans un mouvement rectiligne uniformément accéléré, on peut établir

l'équation mathématique horaire de la position  $x = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$  et deux équations mathématiques horaires de la vitesse :  $v = v_0 + a(t - t_0)$  et  $v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$ . Les représentations graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniformément accéléré sont données dans la **figure 16**.

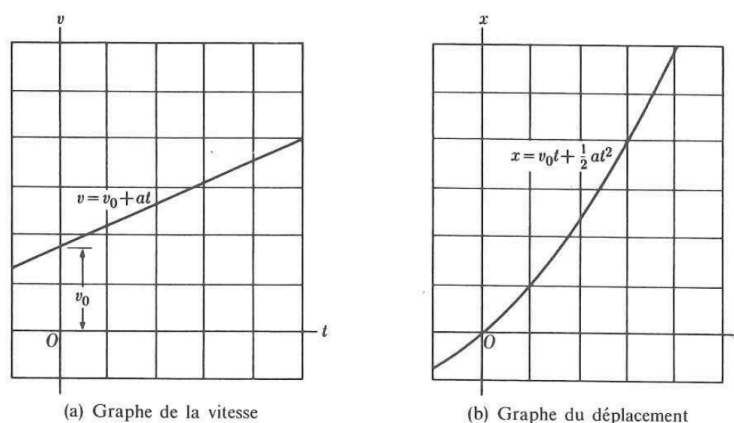


Figure 16- Graphiques de la vitesse et du déplacement d'un objet matériel en mouvement rectiligne uniformément accéléré (Alonso et Finn, 1986, p. 82)

Plusieurs phénomènes physiques suivent un MRUA. Le cas le plus classique est celui de la chute libre qui se produit sous le seul effet de la force gravitationnelle. Si nous négligeons la résistance de l'air et d'autres frottements, tous les objets matériels « tombent » avec la même accélération due à la force gravitationnelle (pesanteur), quelle que soit leur masse, et ce, avec une accélération vers le bas dont le module est approximativement  $9,8 \text{ m/s}^2$  près de la surface de la Terre<sup>67</sup>. Cette propriété importante révèle la nature profonde de la gravité, mais aussi la perception précise du rôle joué par le frottement qui a mis des siècles pour s'établir. Aristote prétendait que le vide ne peut exister et que les objets tombent toujours dans un certain milieu matériel. Cette conception menait à de fausses conclusions comme celle que les corps tombent avec des vitesses différentes, proportionnelles à leurs masses. Mais Galilée affirma plus tard que dans le vide où il n'y a aucune résistance de l'air, tous les corps tombent à la même vitesse. Diverses observations expérimentales menées par des physiciens ont conduit par la suite à montrer que tous les objets en chute libre atteignent une vitesse maximale déterminée par la forme, la surface et la masse de l'objet. En laboratoire, on peut observer qu'un objet léger de grande superficie (ex. : un morceau de papier) a une vitesse limite faible, atteinte rapidement, mais que si nous réduisons la superficie de cet objet (en mettant en boule un morceau de papier) de manière à réduire sa résistance à l'air sans modifier sa masse, cet objet atteindra une vitesse limite plus grande après un temps plus grand.

L'expérience quotidienne nous apprend que des objets matériels sans support tombent vers le sol, que leur vitesse au moment de l'impact s'accroît si la hauteur de la chute augmente, et que cela peut être attribué à l'accélération gravitationnelle exercée par la Terre. Néanmoins, deux aspects essentiels de l'accélération gravitationnelle ne sont pas directement observables dans la réalité quotidienne. Supposons que la pesanteur soit le seul facteur qui influence le mouvement d'un objet en chute libre au voisinage de la surface de la Terre et que la résistance de l'air soit négligée, on peut affirmer que : 1) l'accélération gravitationnelle est la même pour tous les objets

---

<sup>67</sup> Dans ce cas, en choisissant comme positive la direction vers le haut, nous posons  $a = -g$ , le signe étant moins dû au fait que l'accélération de la pesanteur est toujours vers le bas. Cette valeur peut être considérée toujours près de  $9,8 \text{ m/s}^2$  si l'objet matériel n'est pas trop éloigné de la surface de la Terre.

qui tombent, quelles que soient leur taille ou leur composition ; 2) l'accélération gravitationnelle est constante, c'est-à-dire qu'elle ne varie pas au cours de la chute de l'objet. Ces affirmations sont contrintuitives et ne cadrent pas avec l'expérience quotidienne. En effet, l'observation dans la réalité d'une pièce de monnaie qui tombe plus vite qu'une plume contredit la première affirmation. Des objets qui tombent de hauteurs importantes atteignent une vitesse maximale, appelée la *vitesse limite*, en raison du frottement de l'air, ce qui contredit la seconde affirmation. Les deux affirmations ne sont valables que dans un milieu expérimental contrôlé, par exemple dans un réservoir où nous évacuons l'air à l'aide d'une pompe.

Ces deux aspects essentiels de l'accélération gravitationnelle nous conduisent à dire qu'elle devrait faire l'objet d'une investigation en laboratoire de physique à l'école secondaire. Par ailleurs, elles mettent en évidence la nécessité de toujours spécifier le domaine de validité dans lequel un modèle fonctionne, sans quoi il est impossible de tirer des conclusions valides sur le phénomène en question. Pour une pièce de monnaie qui tombe d'une faible hauteur initiale et donc à une faible vitesse, le modèle de la chute libre négligeant la résistance de l'air peut être considéré comme une bonne approximation du phénomène. Cependant, si la hauteur initiale est élevée, la pièce de monnaie offrira une grande résistance à l'air à un certain moment de sa chute, et par conséquent, le modèle de la chute libre négligeant la résistance de l'air ne pourra être considéré.

Enfin, d'autres phénomènes physiques suivent un MRUA comme le mouvement vertical ascendant qui se produit après la propulsion d'un objet matériel vers le haut, le mouvement d'un objet sur un plan incliné ascendant (l'objet est propulsé vers le haut sur le plan incliné) ou descendant (l'objet dévale le plan incliné sans propulsion initiale). Dans un mouvement balistique, la composante verticale du mouvement est également un MRUA. S'il est possible d'étudier le mouvement des objets matériels sous l'angle de la cinématique sans nécessairement prendre en compte les causes de leur mouvement, on ne peut néanmoins négliger le fait que le mouvement de ces objets s'explique par des forces. En appliquant la 2<sup>e</sup> loi de Newton, on peut facilement montrer que le module de l'accélération sur un plan incliné est une constante dont la valeur est proportionnelle au sinus de l'angle de ce plan.

### 4.3 Le mouvement balistique

Le mouvement balistique d'un objet matériel lancé près de la surface de la Terre est un bon exemple du rôle essentiel joué par la loi d'inertie formulée par Newton : *tout corps reste immobile ou conserve un mouvement rectiligne et uniforme aussi longtemps qu'aucune force extérieure ne vienne modifier son état*. En d'autres mots, la loi de l'inertie stipule qu'en l'absence de forces externes, un objet matériel se déplace indéfiniment en ligne droite dans la direction de son lancement, à une vitesse horizontale constante et égale à sa vitesse initiale. Cela se produit en l'absence de gravité et de résistance de l'air. Un corps de grande taille comme la Terre exerce sur tout corps proche une force verticale vers le bas. C'est cette force qui modifie le mouvement horizontal en le courbant vers le bas. Si cette loi a été formulée par Newton, celui-ci attribua sa découverte à Galilée. En effet, avant Newton, Galilée comprenait à la fois la chute libre et la loi d'inertie. Il considérait le mouvement d'un projectile comme une superposition de deux mouvements indépendants : un mouvement inertiel rectiligne et horizontal, en théorie à vitesse constante, et une chute gravitationnelle verticale, en théorie à accélération constante. Il expliqua qu'un corps est dévié de sa trajectoire rectiligne en raison de l'attraction gravitationnelle verticale vers le bas et de la force de frottement qui est tangente à la trajectoire. À ce sujet, Galilée énonça l'affirmation suivante : « Si l'on néglige la résistance de l'air, je crois fermement que si au moment de la sortie de l'obus de la pièce [du canon], on lâche un autre droit vers le bas, les deux arrivent au sol en même temps ». En conséquence, les composantes (position, vitesse et accélération) du mouvement d'un objet matériel suivant un mouvement balistique peuvent être obtenues par les équations du MRU pour le mouvement horizontal et par les équations du MRUA pour le mouvement vertical.

En laboratoire, divers problèmes de balistique peuvent être explorés par les élèves, parmi lesquels au moins deux méritent d'être évoquées. Un premier problème pourrait consister à étudier le mouvement de deux billes d'acier libérées simultanément d'un support situé à une certaine hauteur du sol : la première bille est projetée horizontalement par un ressort alors que la seconde tombe à la verticale. Dans ce problème, les élèves pourraient constater que les deux billes atteignent le sol au même moment, et chercher à expliquer le phénomène à l'aide de modélisations

appropriées. Un second problème pourrait consister à étudier le mouvement d'un projectile lancé par un canon en direction d'un animal en peluche. Au moment où le projectile sort du canon, l'animal en peluche se détache de son support et commence à tomber. Dans ce problème, les élèves pourraient constater que si le projectile et l'animal en peluche sont libérés simultanément, ils se rencontrent au point indiqué par la croix, en raison de l'accélération gravitationnelle qui agit uniquement sur la composante verticale du mouvement du projectile (**figure 17**).

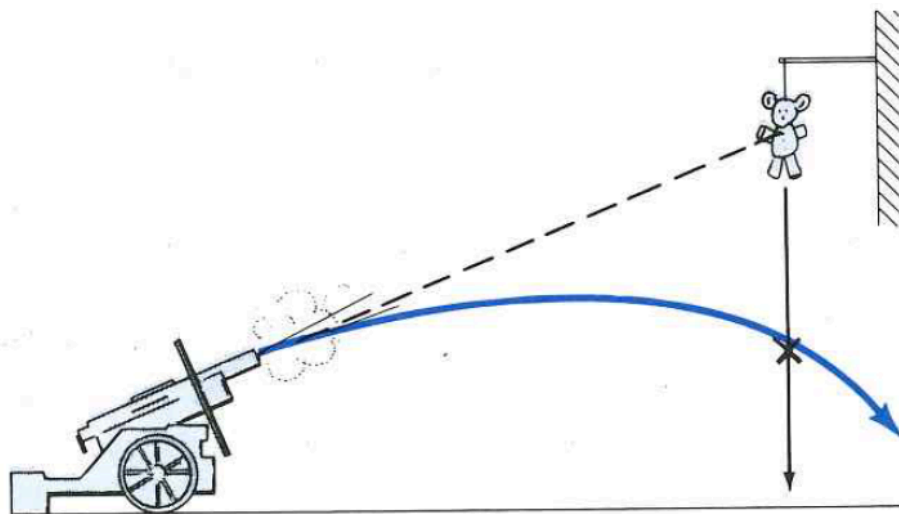


Figure 17- Point de rencontre d'un projectile et d'un animal en peluche libérés simultanément (Kane et Sternheim, 1997, p. 34)

Dans l'étude d'un mouvement balistique, plusieurs paramètres peuvent être étudiés, par exemple la relation entre le temps de vol ou la portée d'un projectile (la distance horizontale entre le point de départ et le point de chute) et la force de propulsion ou l'angle d'inclinaison retenu pour le lancement du projectile.

L'apprentissage du domaine de la cinématique permet de faire prendre conscience aux élèves que les phénomènes physiques sont souvent d'une grande complexité et que leur compréhension ne peut être accessible que par des modèles basés sur des approximations et construits sur des hypothèses simplificatrices. De manière à ce que les élèves puissent se donner une meilleure compréhension des divers modèles du mouvement de la cinématique (MRU, MRUA et MB), il s'avère essentiel de construire chez eux un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique. Ce capital se construit par l'investigation de plusieurs situations expérimentales

qui touchent un même modèle du mouvement et par des analyses comparatives de situations expérimentales qui mettent en jeu différents modèles du mouvement afin de dégager leurs similitudes et leurs spécificités. Dans les processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, nous proposons par ailleurs une construction des modèles à travers laquelle il y a mise en relation entre des registres de représentation sémiotique : schéma de points de la trajectoire d'un objet matériel, données tabulaires de la vitesse, schémas vectoriels illustrant les composantes verticale et horizontale de la vitesse, équations mathématiques, etc. Les idées que nous avons formulées dans les paragraphes qui précèdent mettent en évidence la place centrale des modèles mathématiques dans la compréhension des phénomènes pouvant être expliqués par les outils de la cinématique. Si les modèles mathématiques sont de puissants outils pour analyser de manière rigoureuse les phénomènes à l'étude, ils peuvent également contribuer à fournir une compréhension qualitative de ceux-ci.

#### **4.4 Des facettes de savoir pour accéder à la compréhension des phénomènes physiques par les élèves**

Comme nous l'avons souligné, l'engagement des élèves dans des démarches de modélisation entraîne une double conceptualisation : l'élaboration conceptuelle des modèles associés aux phénomènes physiques à l'étude, d'une part, et l'élaboration des faits scientifiques qui découlent des modèles construits, d'autre part. Ces faits portent sur les variables en jeu dans la modélisation des objets matériels (la position, le déplacement, la vitesse, la variation de la vitesse, et l'accélération), et plus directement sur le comportement des phénomènes physiques modélisés par les modèles du MRU, du MRUA ou du MB. En physique, comme c'est le cas dans d'autres disciplines scientifiques, les faits pouvant être construits par les élèves ne se présentent pas uniquement sous une forme conceptuelle et ne s'expriment pas uniquement à travers le registre langagier usuel (les mots, les phrases, etc.), mais plutôt sous diverses formes : algébrique, graphique, vectorielle, etc. Ces faits, lorsqu'ils sont mobilisés par les élèves, sont des témoins précieux pour évaluer leur compréhension des phénomènes physiques.

Pour accéder à la compréhension des phénomènes physiques par les élèves, nous nous appuyons sur les travaux de Minstrell (1992a, 1992b) et de Galili et Hazan (2000), dont l'objectif consiste à caractériser les connaissances d'élèves du secondaire dans le champ de la physique à partir de « facettes de savoir » (« Facet of knowledge »). Ce concept a été développé sur la base des travaux en épistémologie de la physique menés par diSessa (1993) qui appréhende le savoir en tant que petits éléments fragmentés (« Knowledge in Pieces »). Dans leur description des connaissances des élèves, Minstrell (1992a, 1992b) et Galili et Hazan (2000) identifient et cataloguent les facettes de savoir que les élèves semblent appliquer dans des situations problématiques<sup>68</sup>. Ces éléments, formulés dans le langage des élèves, sont des énoncés qui ont la taille d'une phrase et qui se réfèrent à ce que « les élèves disent ou font face à une situation dans laquelle ils sont invités à prédire ou expliquer un phénomène physique »<sup>69</sup>. Ils constituent « une tentative d'organiser la compréhension conceptuelle des phénomènes chez les élèves »<sup>70</sup> (Minstrell, 1992b). Pour Minstrell (1992a, 1992b), les facettes représentent des constructions théoriques alternatives à la connaissance scientifique et peuvent se rapporter au contenu, à des stratégies de résolution, ou un élément générique de raisonnement, telles une relation causale, une déduction. En nous appuyant sur divers travaux menés dans le champ de la physique, nous retenons quatre catégories de facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Malkoun, 2007 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a) : les facettes de savoir conceptuelles, de représentation symbolique, langagières et procédurales. Ces facettes peuvent être formulées par les acteurs de la classe à travers leurs discours et gestes tout au long des séquences d'enseignement.

Les facettes conceptuelles sont des composantes de concepts ou de relations entre des concepts qui permettent de donner sens à ces constructions théoriques. Dans la description des facettes de savoir, nous nous limitons à celles qui appartiennent au domaine de la cinématique en les catégorisant selon les groupes de concepts prescrits de cinématique dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire : temps, référentiel, position, trajectoire, distance parcourue,

---

<sup>68</sup> Pour plus de détails sur les codes de facette de Minstrell, voir à l'adresse Internet <http://depts.washington.edu/huntlab/diagnoser/facetcode.html#edf>.

<sup>69</sup> Traduction libre : « students say or do when confronted with a situation in which they are asked to predict or explain a physical phenomenon » (Minstrell, 1992b)

<sup>70</sup> Traduction libre : The Facet Codes are our attempt to organize the phenomena of students' conceptual understanding. » (Minstrell, 1992b)

déplacement, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération, accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré et mouvement balistique. À titre d'exemples, on peut considérer les facettes conceptuelles « La position d'un mobile sur l'axe des  $x$  est positive s'il se trouve à droite de l'origine du référentiel », « Un mobile en mouvement dans le sens de la référence (vers la droite) sur l'axe des  $x$  a un déplacement positif », « La vitesse instantanée (scalaire ou vectorielle) tient compte d'un  $\Delta t$  qui tend vers 0 », « Un mobile en accélération a une position qui varie de plus en plus vite ou de moins en moins vite dans le temps », « Dans un mouvement rectiligne uniformément accéléré, la distance parcourue entre deux intervalles de temps égaux consécutifs est constante », « Dans un mouvement balistique, la vitesse verticale diminue dans le mouvement ascendant ».

Les facettes de représentations symboliques recouvrent les règles de construction de différents registres de représentation sémiotique. Ces facettes imprègnent l'enseignement de la physique, car « tous les modèles de la physique, scientifiques ou scolaires, s'appuient sur des représentations » (Bécu-Robinault, 2005, p. 57), et les élèves donnent du sens aux modèles en s'appropriant et en articulant divers registres de représentation des concepts lors de la modélisation d'un phénomène. Ainsi, les facettes jouent un rôle important dans la construction des savoirs disciplinaires en sciences, celles-ci étant inséparables de la construction des symbolismes spécifiques pour représenter les objets de savoir et leurs relations (Duval, 1993, 1995). Dans le domaine de la cinématique, nous distinguons 5 sous-groupes de facettes de représentation symbolique suivants : les facettes algébriques, les facettes graphiques, les facettes vectorielles, les facettes de symbole et les facettes unités. À titre d'exemples illustratifs, on peut considérer les facettes de représentation symbolique « Dans un mouvement en chute libre, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et la position est  $v_f^2 = v_i^2 + 2g\Delta t$  ou une relation équivalente », « La pente de la tangente du graphique vitesse-temps entre deux instants très près donne la vitesse instantanée d'un mobile », « Le vecteur déplacement est la différence entre les vecteurs position finale et position initiale », « Le symbole de la position est  $X$ ,  $Y$  ou  $S$  », « L'unité de mesure usuelle de l'accélération est le  $m/s^2$  ».



Les facettes procédurales consistent en des procédures, des stratégies, des opérations, etc. à mettre en œuvre en relation avec les savoirs disciplinaires. Nous sommes conscients de l'existence de facettes procédurales générales associées à la modélisation en physique telles que : « On doit effectuer plusieurs mesures à l'aide d'un instrument afin de recueillir des données qui permettent de construire un modèle ». Cependant, dans cette thèse, nous ne considérons que les facettes procédurales en lien avec la construction des concepts prescrits au programme. À titre d'exemples, nous considérons les facettes procédurales « On détermine le déplacement d'un mobile entre deux instants en calculant l'aire sous la courbe du graphique vitesse-temps », « On détermine la distance parcourue par un mobile entre deux instants en calculant l'aire sous la courbe du graphique vitesse-temps », « On détermine la vitesse instantanée d'un mobile en calculant la pente du graphique position-temps entre deux instants très près », « On détermine la variation de la vitesse d'un mobile en calculant l'aire sous la courbe du graphique accélération-temps », « On détermine l'accélération d'un mobile en calculant la pente du graphique vitesse-temps », « Pour voir si un objet est en mouvement, on calcule sa variation de position dans le temps ».

Les facettes langagières correspondent aux énoncés qui interpellent l'utilisation de la langue naturelle pour représenter les savoirs disciplinaires de la physique. Comme le progrès des connaissances en sciences s'accompagne toujours de la création et du développement de systèmes sémiotiques qui coexistent avec la langue naturelle, nous pensons que la langue naturelle joue également un rôle déterminant dans l'apprentissage des savoirs disciplinaires de la physique. Rappelons ici le schéma de la théorie spécifique des deux mondes qui met en exergue la place du savoir commun dans la construction du savoir en physique (Veillard *et al.*, 2011) (**figure 7**). Ainsi, les facettes langagières permettent de distinguer les savoirs quotidiens des savoirs disciplinaires de la physique. À titre d'exemples, nous considérons les facettes langagières « En physique, contrairement dans le langage courant, le déplacement se distingue de la distance parcourue »<sup>71</sup> et « Dans le langage courant, l'accélération signifie une augmentation de la vitesse alors qu'en physique, l'accélération inclut les situations où il y a diminution de la vitesse ».

---

<sup>71</sup> Remarque : les élèves confondent souvent entre le déplacement et la trajectoire alors que le déplacement d'un objet est indépendant de la trajectoire suivie.

En nous appuyant sur divers ouvrages scientifiques francophones et anglo-saxons portant sur la physique mécanique (Alonso et Finn, 1986 ; Gibaud et Henry, 1999 ; Hecht, 2000 ; Kane et Sternheim, 1997 ; Mercier, 1945 ; Pérez, 1989 ; Serway et Boisvert, 1992) et sur des matériels didactiques pour l'enseignement de la physique en 5<sup>e</sup> secondaire (Bensaada et Ouellette, 2010 ; Champagne, Séguin, et Cossette, 2017a, 2017b), nous avons réalisé une analyse conceptuelle du domaine de la cinématique en vue de dégager les facettes de savoir que nous jugeons fondamentales pour l'apprentissage de ce domaine de la physique ([annexe 2](#))<sup>72</sup>. Cette analyse *à priori* met en jeu des facettes de savoir associées aux groupes de concepts prescrits du domaine de cinématique dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire : temps, référentiel, position, trajectoire, distance parcourue, déplacement, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération, accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré et mouvement balistique. Ces facettes, formulées selon le « niveau de formulation » (Astolfi et Develay, 2002) approprié pour la fin de l'enseignement secondaire, servent de base à l'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation dans les deux classes.

Dans la prochaine section, nous définissons le concept de pratique d'enseignement de manière opérationnelle, en soulignant les aspects essentiels retenus à des fins méthodologiques et qui seront développés ultérieurement dans la cadre d'analyse. Ce cadre fournit les balises nécessaires à l'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en physique.

## 5. LE CONCEPT DE PRATIQUE D'ENSEIGNEMENT

La documentation scientifique fait état d'un foisonnement d'appellations pour désigner la classe comme objet d'étude. Parmi les concepts les plus souvent invoqués, nous pouvons citer ceux de « pratique enseignante » et de « pratique d'enseignement » (Altet, 2002 ; Bru *et al.*, 2004 ; Chappet Paries, 2004 ; Clanet, 2005 ; Lenoir *et al.*, 2007 ; Lenoir et Vanhulle, 2006 ; Mercier et

---

<sup>72</sup> Dans cette annexe, nous avons exclu la présentation des facettes de savoir de représentation symbolique (symbole et unité).

Buty, 2004 ; Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) qui se réfèrent aux concepts de « teaching practice » ou de « practice of teaching » dans le monde anglo-saxon (Buty, Tiberghien et Le Maréchal, 2004 ; Campbell et Erdogan, 2005 ; Chin, 2007 ; Erdogan et Campbell, 2008 ; Mellado, 1998 ; Scott, Mortimer et Aguiar, 2006 ; Seidel et Prenzel, 2006 ; Seidel, Sturmer, Blomberg, Kobarg et Schwindt, 2011). D'autres concepts comme ceux de « pratique en classe » (« cassroom practice ») (Chappet Paries, 2004 ; Mellado, 1998 ; Mortimer, 1998 ; Robert, 2007) et de « pratique pédagogique » (« pedagogical practice ») (Bru, 2002 ; Bru *et al.*, 2004 ; Mellado, 1998 ; Mercier et Buty, 2004) recouvrent également celui de pratique d'enseignement, mais dans une moindre fréquence<sup>73</sup>.

Si le choix d'utiliser un concept particulier pour désigner la classe comme objet d'étude renvoie à la posture épistémologique que peut prendre le chercheur pour étudier la pratique, des concepts distincts relatifs aux pratiques sont souvent utilisés comme des synonymes dans les textes. Pour notre part, c'est le concept de pratique d'enseignement qui sera retenu dans cette thèse. Sans vouloir prétendre ici caractériser de manière exhaustive ce concept, il nous semble important d'exposer quelques attributs caractéristiques<sup>74</sup> de ce concept.

## 5.1 La distinction entre pratique enseignante et pratique d'enseignement

Dans un premier temps, nous distinguons, comme le font plusieurs auteurs (Altet, 2001 ; Altet, 2002 ; Lenoir *et al.*, 2007 ; Lenoir et Vanhulle, 2006), les concepts de « pratique enseignante » et de « pratique d'enseignement ». Pour Altet (2001, p. 11), la *pratique enseignante* « englobe à la fois la pratique d'enseignement face aux élèves, avec les élèves, mais aussi la pratique de travail collectif avec des collègues, la pratique d'échanges avec les parents, les pratiques de partenariat. Elle recouvre à la fois des actions, des réactions, des interactions, des transactions et ajustements pour s'adapter à la situation professionnelle ». Quant à la *pratique*

---

<sup>73</sup> Ce constat est tiré d'une analyse sommaire d'une quarantaine d'articles scientifiques portant sur les pratiques d'enseignement (pour la période 1990-2015) réalisée dans le cadre d'un travail dirigé sous la supervision du Pr. Hasni.

<sup>74</sup> Pour en savoir davantage sur les caractéristiques de concet de pratique d'enseignement, voir à ce sujet les 23 attributs proposés par Lenoir, Maubant, Hasni, Lebrun, Zaid, Habboub et McConnell, (2007) pour définir le concept d'intervention éducative.

*d'enseignement*, elle renvoie à tout ce que l'enseignant met en œuvre avant, pendant et après la classe (Robert et Rogalski, 2002), mais essentiellement en relation avec les activités qui s'organisent autour du temps de classe, en présence des élèves, et qui s'actualisent temporellement au sein de trois phases distinctes et interdépendantes (Altet, 2001 ; Bru et Talbot, 2001 ; Lenoir, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007).

- La *phase préactive*, d'anticipation porte sur l'intention initiale de l'action et de la planification de l'activité (qu'elle soit structurée ou non), saisies avant l'action en tant que projet (des "motifs-en-vue-de"). Elle correspond à un « anticipation perceptive [d'un] rapport au futur qui n'est en pas un, un futur qui est quasi présent » (Bourdieu, 1994, p. 155) du fait qu'elle découle d'un *habitus* et contient déjà la certitude des opérations à venir.
- La *phase interactive*, d'effectuation en classe où l'intention d'action initiale s'actualise en tant que manifestée dans l'action elle-même (l'agir tel qu'observé), et qui permet de décrire la configuration de l'activité, la structuration du cheminement réalisé (sa séquentialisation).
- La *phase postactive*, de rétroaction, qui renvoie à l'interprétation du plan, de l'acte posé et des intentions considérées *post hoc* se caractérise par une légitimation qui conduit à l'expression d'une argumentation justificatrice (les "motifs-parce-que") (Lenoir et Vanhulle, 2006) de l'action effective. Rétrospective, l'interprétation de l'action effectuée « est le résultat d'une réflexion à posteriori liée à l'effort d'objectivation » (Friedrich, 2001, p. 103). Cela conduit à analyser la pratique d'enseignement en prenant en considérant ces trois phases interdépendantes. Ainsi, la pratique d'enseignement dépasse en amont et en aval « l'activité déployée par l'enseignant en situation de classe, dans le but affiché que ses élèves s'engagent ou poursuivent leur activité en vue d'apprentissage » (Talbot, 2005, p. 35).

## 5.2 La pratique d'enseignement comme activité finalisée

La pratique d'enseignement consiste en une activité professionnelle qui s'organise en fonction de finalités éducatives socialement déterminées par la culture, ainsi que par les contenus

et les orientations curriculaires. Ainsi, elle s'inscrit dans des pratiques sociales de référence spécifiques qui se distinguent d'autres pratiques comme celles de l'infirmière ou de l'ingénieur. À ce sujet, Altet (2002, p. 86) souligne que la pratique d'enseignement « renvoie à une activité professionnelle située, orientée par des fins, des buts et les normes d'un groupe professionnel. Elle se traduit par la mise en œuvre des savoirs, procédés et compétences en actes d'une personne en situation professionnelle ». Pour Lenoir *et al.* (2007, p. 32-33), la pratique d'enseignement

est doublement finalisée du fait que l'enseignant, comme tout autre professionnel, agit auprès d'autrui en fonction d'une visée d'amélioration d'une situation considérée problématique (il vient entre un sujet et une situation-problème) dans un cadre socialement normé : d'une part, elle doit s'inscrire au sein des finalités déterminées institutionnellement par les politiques gouvernementales, par le curriculum, etc. ; d'autre part, il s'agit d'une action intentionnelle, dirigée vers la réussite scolaire des élèves par leur acquisition des objectifs éducatifs socialement déterminés.

En conséquence, Lenoir *et al.* (2007, p. 32) stipulent que la pratique d'enseignement « est toujours située, s'inscrivant dans un contexte social, historique et spatial donné » et qu'elle « n'est donc pas simplement action, mais proaction (Guay, 1991) puisque l'action est anticipatrice sur le plan des finalités. » (*Ibid.*, p. 33).

### **5.3 La pratique d'enseignement comme activité universelle et singulière**

Cependant, si la pratique d'enseignement s'inscrit dans des pratiques sociales de référence qui lui sont propres, elle est néanmoins singulière (Bressoux, Bru, Altet et Leconte-Lambert, 1999), en ce sens qu'elle représente « la manière de faire singulière d'une personne, sa façon réelle, propre, d'exécuter une activité professionnelle : l'enseignement » (Altet, 2002, p. 86). Elle résulte « de recompositions singulières (personnelles) à partir des connaissances, représentations, expériences, et de l'histoire individuelle en fonction de l'appartenance à une profession » (Robert et Rogalski, 2002, p. 508). Nous postulons que la pratique d'enseignement se construit dans mouvement bidirectionnel entre l'*Universel* correspondant aux pratiques sociales de référence généralement admises par la communauté enseignante, et le *Particulier* correspondant aux pratiques d'enseignement individuelles de chaque enseignant et qui s'influencent mutuellement. Cela conduit à analyser la pratique d'enseignement en prenant en compte le savoir à enseigner (celui

inscrit dans le curriculum officiel), le savoir enseigné visé (celui que l'enseignant a l'intention d'enseigner) et le savoir effectivement enseigné (le savoir qui circule réellement en classe).

#### **5.4 La pratique d'enseignement comme action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage**

La pratique d'enseignement s'articule autour d'une action conjointe de l'enseignement et de l'apprentissage (Mercier, Schubauer-Leoni et Sensevy, 2002 ; Santini et Sensevy, 2011 ; Sensevy, 2007, 2008, 2011), ce qui signifie qu'on ne peut comprendre *à priori* l'action de l'enseignant ou de l'élève sans la référer à celle de l'autre (Santini et Sensevy, 2011, p. 1) : « Le préfixe *trans-* signifie alors que l'action didactique prend sa forme, pour le professeur “à travers” l'élève, et, pour l'élève, “à travers” le professeur. Il doit donc inciter celui qui décrit l'action didactique du professeur ou de l'élève à chercher son “complément” dans l'action de l'autre afin de mieux les comprendre. ». L'action conjointe « ne suppose pas une “symétrie des positions tenues par les acteurs” ; le professeur enseigne et les élèves sont à l'école pour apprendre » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 30), ce qui nous conduit à considérer les pratiques d'enseignement et d'apprentissage sous le point de vue de ce qui est enseigné et appris. Comme le souligne Sensevy (2007, p. 14), « ce qui caractérise une institution didactique, c'est qu'on y enseigne à des personnes censées apprendre » et cette action est « fondée sur une communication dans la durée entre le professeur et les élèves, donc sur une relation qui actualise l'action, et qui est actualisée en retour par celle-ci ». L'action conjointe s'opérationnalise dans le contexte de la triple relation didactique entre le savoir, l'enseignant et les élèves. Pour Sensevy (2007, p. 14), la relation entre pratique d'enseignement et pratique d'apprentissage « est centrée sur un objet bien précis : le savoir qui doit être transmis, en donnant à ce dernier terme (transmis) le sens anthropologique général de la transmission ». De ce fait, ce sont essentiellement les savoirs qui structurent les pratiques d'enseignement et d'apprentissage : « Nous persuadant en effet que les savoirs donnent leurs formes aux pratiques d'enseignement et d'apprentissage, nous voulons plus généralement considérer que ce sont les contenus des pratiques qui déterminent leur structure. [...] comprendre l'action, c'est d'abord comprendre comment le contenu propre à cette action la spécifie » (*Ibid.*, p.

12-42)<sup>75</sup>. C'est dans cette perspective que nous considérons la pratique d'enseignement en nous centrant sur les savoirs qui la structurent. Pour reprendre les propos de Lenoir *et al.* (2007, p. 33), la pratique d'enseignement « est interactive, car elle n'existe que par les interactions qui s'établissent entre les élèves et l'enseignant » et elle « est par essence intrusive, puisqu'elle s'introduit entre l'élève et les objets de savoir. »

## 5.5 La pratique d'enseignement comme activité multimodale

La pratique d'enseignement est dialectique « en ce sens qu'elle instaure un dialogue, une confrontation discursive de points de vue distincts qui impliquent des élèves, des savoirs et un ou des enseignants. Il s'agit d'une praxis existentielle et sociale qui intègre dialectiquement (par des processus médiateurs) discours, action, pratique et réflexion critique » (Lenoir *et al.*, 2007, p. 32). De ce fait, la pratique d'enseignement est multimodale, en ce sens qu'elle s'opérationnalise non seulement par des interactions discursives (entre l'enseignant et les élèves et entre les élèves), mais aussi par des gestes en situation, ancrés dans l'immédiateté du quotidien (Bru et Talbot, 2001) et qui se traduisent « dans l'utilisation originale de [...] savoir-faire dans une situation particulière » (Villers, 1996, p. 294). Cela nous conduit à analyser la pratique d'enseignement dans ses interactions avec les élèves en ayant comme centration l'articulation séquentielle des actions, discours et gestes de l'enseignant et des élèves au sein des activités en relation avec les objets de savoir visés (Lenoir, 2015).

---

<sup>75</sup> Dire que les savoirs donnent leur forme aux pratiques d'enseignement et d'apprentissage nécessite d'explicitier la manière avec laquelle ces savoirs sont introduits et mobilisés dans les actions didactiques partagées par l'enseignant et les élèves (Tiberghien *et al.*, 2007a). Ainsi, les savoirs ne sont pas des données accessibles directement à l'observateur. Ils sont le résultat d'une reconstruction effectuée par le chercheur quant aux significations que les acteurs donnent à ces savoirs en contexte à travers des productions (orales et écrites) et gestuelles (*Ibid.*). Cette reconstruction du savoir se fait à plusieurs échelles de temps et de granularité comme nous le verrons plus loin.

## 5.6 La pratique d'enseignement comme activité multidimensionnelle

Enfin, la pratique d'enseignement est multidimensionnelle (Altet, 2001, 2002 ; Beillerot, 1996, 1998 ; Bru *et al.*, 2004 ; Bru et Talbot, 2001 ; Lenoir *et al.*, 2007 ; Lenoir et Vanhulle, 2006). Dans leurs travaux visant à construire un cadre conceptuel pour analyser les pratiques d'enseignement, Lenoir *et al.* (2007) ont développé le construit d'intervention éducative<sup>76</sup> afin d'appréhender la pratique d'enseignement dans sa globalité et sa complexité multidimensionnelle (Lenoir et Vanhulle, 2006). Ces travaux ont permis d'identifier 10 dimensions de la pratique d'enseignement qu'ils regroupent en trois perspectives (**figure 18**) : une perspective socioéducative relative à l'évolution du système scolaire et aux réalités sociales (dimensions contextuelles et historiques) ; une perspective socioéducative relative au cadre de référence de l'enseignant, externe (dimensions curriculaires) et interne (dimensions épistémologiques, socioaffectives, morales et éthiques) ; une perspective opératoire qui représente l'actualisation de ce cadre de référence au sein des pratiques d'enseignement (dimensions didactiques, psychopédagogiques, organisationnelles, médiatrices). À cet égard, la pratique d'enseignement « est constituée d'une structure de rapports en tension entre les différentes dimensions qui la constituent, dont les dimensions curriculaires, les dimensions didactiques (rapport au savoir/aux savoirs/de savoirs), les dimensions psychopédagogiques (rapport aux élèves/à l'élève), les dimensions organisationnelles (rapport à la gestion de l'enseignement en tant que rapport à l'espace classe, au temps et aux moyens organisationnels), le tout ancré dans un contexte (rapport au social et à l'institution) spatiotemporellement déterminé » (Lenoir *et al.*, 2007, p. 32). En conséquence, nous analysons la pratique d'enseignement des enseignants de notre échantillon sous l'angle de plusieurs dimensions que nous explicitons dans le cadre d'analyse développé dans la prochaine section.

---

<sup>76</sup> Par intervention éducative, nous entendons dès lors, d'un point de vue opérationnel, l'ensemble des actes et des discours singuliers et complexes, finalisés, motivés et légitimés, tenus par une personne mandatée intervenant dans une perspective de formation, d'autoformation ou d'enseignement dans un contexte institutionnellement spécifique – ici l'institution scolaire – en vue de poursuivre les objectifs éducatifs socialement déterminés (Lenoir *et al.*, 2007, p. 30-31).



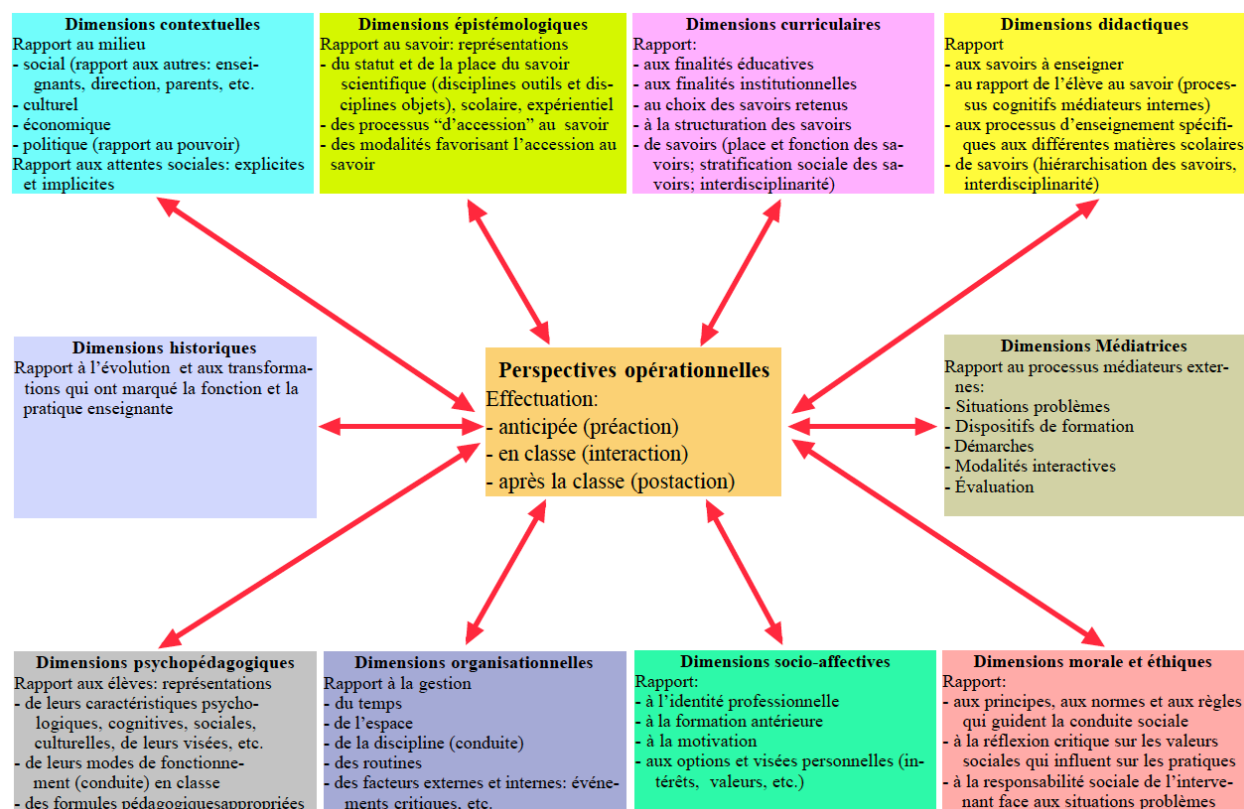


Figure 18- Dimensions du concept d'intervention éducative (Lenoir et Vanhulle, 2006, p. 230)

Les cinq attributs caractéristiques retenus pour caractériser la pratique d'enseignement constituent des éléments fondateurs du cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation. Ainsi, dans le cadre d'analyse que nous développons dans la section suivante, la pratique d'enseignement est considérée comme une activité temporelle (se déroulant sur les phases préactive, interactive et postactive), finalisée (poursuivant des finalités plus ou moins explicites), multimodale (s'exprimant à travers des actions, discours et gestes), à la fois universelle et singulière (mettant en relation/tension pratiques sociales de référence et pratiques individuelles) et multidimensionnelle. Par ailleurs, la pratique d'enseignement est appréhendée dans le cadre de la théorie de l'action conjointe en didactique où la construction de significations partagées entre l'enseignant et les élèves s'actualise au travers de transactions didactiques produites de manière conjointe par ces acteurs et pour lesquelles le savoir lié aux modèles et à la modélisation est le principal objet qui structure ces transactions.

## TROISIÈME CHAPITRE : LE CADRE D'ANALYSE DES PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ORDINAIRES DES MODÈLES ET DE LA MODÉLISATION

Se positionnant entre le cadre conceptuel et la méthodologie, le cadre d'analyse vise à présenter sommairement les choix opérés pour l'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation. En mettant en relation les concepts de modèle et de modélisation avec le concept de pratique d'enseignement, ce cadre consiste en une transition opératoire du cadre conceptuel. De ce cadre d'analyse découlent des procédures d'analyse des données que nous présentons de manière détaillée dans la méthodologie.

Dans cette thèse, nous nous appuyons sur les travaux réalisés dans le monde francophone qui considèrent les pratiques d'enseignement du point de vue des actions conjointes de l'enseignant et des élèves en accordant une place centrale aux savoirs disciplinaires dans l'organisation de ces pratiques (Hasni *et al.*, 2015 ; Hasni et Baillat, 2011 ; Mercier *et al.*, 2002 ; Schubauer-Leoni, Leutenegger, Ligozat et Annick, 2007 ; Sensevy, 2001, 2007, 2008, 2011 ; Sensevy, Schubauer-Leoni, Mercier, Ligozat et Perrot, 2005), et plus particulièrement sur les travaux qui ont établi des relations fortes entre la spécificité des pratiques d'enseignement (ex. : nature des tâches prises en charge par l'enseignant et les élèves, diversité des notions enseignées, cohérence du savoir enseigné, etc.) et la compréhension conceptuelle des élèves en lien avec divers savoirs disciplinaires (ex. : Buty *et al.*, 2004 ; Givry, 2003 ; Kelly, 2011 ; Malkoun, 2007 ; Niedderer *et al.*, 2005 ; Niedderer, Budde, Givry, Psillos et Tiberghien, 2007 ; Roth *et al.*, 2006, 2011 ; Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a, 2008). Notre conception de la pratique d'enseignement inclut la « pratique d'enseignement déclarée » (ce que les enseignants prétendent faire en classe) et la « pratique d'enseignement observée » (celle observée par le chercheur).

Dans notre analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation, nous nous intéressons aux tâches que font l'enseignant et les élèves en relation avec les savoirs disciplinaires en jeu. Pour reprendre Tiberghien *et al.* (2008, p. 4), « il s'agit de décrire et d'analyser comment le savoir enseigné “vit” dans une classe, ses statuts, les enjeux dont il est l'objet, les formes qu'il prend, etc., et comment ce savoir intervient dans la compréhension des élèves. ». Nous

cherchons à voir le potentiel des pratiques d'enseignement des enseignants sur les apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique. Si nous ne considérons pas pour autant que la relation entre enseignement et apprentissage soit directe en raison de la multiplicité des variables qui peuvent influencer les pratiques d'enseignement, nous postulons toutefois que les pratiques d'enseignement ont des effets importants sur les apprentissages des élèves et qu'il est possible de déterminer des caractéristiques de ces pratiques qui favorisent les apprentissages conceptuels chez les élèves.

S'il existe une grande diversité de dimensions possibles pour analyser les pratiques d'enseignement (Lenoir *et al.*, 2007 ; Lenoir et Vanhulle, 2006), les dimensions retenues pour correspondent à celles considérées dans les travaux menés antérieurement au CREAS portant sur l'analyse des pratiques d'enseignement d'enseignants de sciences et technologies sous l'angle de la modélisation (Roy et Hasni, 2014) ou d'autres objets de recherche comme l'interdisciplinarité (Hasni *et al.*, 2008 ; Hasni, Bousadra et Poulin, 2012) ou l'approche par projet (Hasni, Bousadra, et Marcos, 2011) : conceptuelle, opérationnelle, fonctionnelle et organisationnelle. Bien qu'elles soient reliées entre elles, ces dimensions seront présentées ici, par souci de clarté, de manière séquentielle.

## **1. LA DIMENSION CONCEPTUELLE**

La dimension conceptuelle renvoie aux significations que les enseignants attribuent aux deux principaux objets de savoir considérés dans notre étude, soient les modèles et la modélisation. Plus précisément, il s'agit de voir quels sont les attributs utilisés par les enseignants pour caractériser les concepts de modèle et de démarche de modélisation. La dimension conceptuelle d'analyse des pratiques d'enseignement prend toute son importance en ce sens que les conceptions qu'ont les enseignants en regard des objets de savoir influencent généralement leurs pratiques d'enseignement (déclarées et observées) de ces objets. En effet, plusieurs travaux dans le champ de l'éducation scientifique ont montré que les conceptions des futurs enseignants ou des enseignants en regard de la nature des savoirs disciplinaires et de leur enseignement-apprentissage ont une influence importante sur leurs pratiques de classe (Hsu et Roth, 2009). Ainsi, les données recueillies en

relation avec la dimension conceptuelle des pratiques nous permettent de mieux comprendre et interpréter les pratiques d'enseignement des enseignants.

## 2. LA DIMENSION FONCTIONNELLE

La dimension fonctionnelle se réfère aux finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la modélisation. Elle cible les justifications associées à cet enseignement, notamment en relation avec les apprentissages visés. La dimension fonctionnelle se réfère à la composante du *pourquoi enseigner ce qui sera enseigné* dans l'analyse des pratiques d'enseignement d'enseignants de sciences et technologies menées au CREAS (Hasni *et al.*, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007). Plus particulièrement, elle permet de répondre la question formulée par Lenoir *et al.* (2007, p. 16) : « Quelles sont les finalités éducatives poursuivies par l'enseignement et, par là, quels sont les apprentissages visés (le “pourquoi enseigner”) ? ». Dans cette thèse, il s'agit de voir l'utilité ou la nécessité pour les enseignants de faire apprendre à leurs élèves les modèles et la modélisation en physique. En d'autres mots, la dimension fonctionnelle vise à clarifier les intentions éducatives que poursuivent les enseignants dans l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la modélisation, en considérant que ces intentions éducatives, toute comme les conceptions épistémologiques en regard des objets de savoir, ont une influence importante sur leurs pratiques de classe, et que, par conséquent, elles peuvent soutenir le travail du chercheur dans l'interprétation des pratiques d'enseignement.

## 3. LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE

La dimension opérationnelle est au cœur de notre cadre d'analyse vise à explorer comment les modèles et la modélisation s'opérationnalisent dans les pratiques d'enseignement des enseignants. La dimension opérationnelle se réfère aux composantes du *quoi enseigner*, du *comment enseigner ce qui sera enseigné* et du *avec quoi enseigner* dans l'analyse des pratiques d'enseignement d'enseignants de sciences et technologies menés au CREAS (Hasni *et al.*, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007). Plus particulièrement, elle permet de répondre à trois grandes questions formulées par Lenoir *et al.* (2007, p. 16) : « Quels sont les objets d'enseignement, c'est-à-dire quels sont les contenus énoncés dans le curriculum qui doivent faire l'objet d'un enseignement (le “quoi enseigner”) ? », « Quelles sont les modalités d'enseignement adoptées (le “comment

enseigner”) ? » et « À quelles ressources est-il fait appel pour assurer cet enseignement (le “avec quoi enseigner”) ? ».

### 3.1 Le *quoi enseigner*

Le *quoi enseigner* renvoie aux savoirs en jeu dans les pratiques d’enseignement des modèles et de la modélisation. Dans cette thèse, la description du *quoi enseigner* se réfère au savoir à enseigner (celui inscrit dans le curriculum), au savoir enseigné visé (celui que l’enseignant a l’intention d’enseigner et qui est déclaré dans les entrevues pré et postenregistrement) et au savoir effectivement enseigné (le savoir qui circule réellement en classe). Au Québec, ce sont les programmes d’études officiels produits par le MELS qui dictent le savoir à enseigner. Plusieurs composantes disciplinaires peuvent faire l’objet d’enseignement et d’apprentissage en classe de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, parmi lesquelles les compétences disciplinaires<sup>77</sup> et les savoirs disciplinaires. Ces derniers font référence aux ressources à mobiliser et à construire pour le développement des trois compétences disciplinaires en physique : les concepts prescrits, les démarches, les stratégies, les attitudes et les techniques. Dans cette thèse, nous nous centrons essentiellement sur deux types de savoirs : les concepts prescrits et les démarches. Quant aux concepts prescrits que nous désignons pour notre part sous l’appellation de savoirs conceptuels, il s’agit plus particulièrement des modèles du mouvement rectiligne uniforme, du mouvement rectiligne uniformément accéléré et du mouvement balistique qui peuvent être exprimés par divers registres de représentation sémiotique (tabulaire, algébrique, graphiques, vectoriel, etc.). Comme le souligne le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, l’acquisition de ces modèles nécessite une « étude approfondie faisant intervenir un ensemble de concepts [...] qu’il importe de distinguer et

---

<sup>77</sup> Dans le programme de physique, la première compétence (C1) *chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique* « met l’accent sur la méthodologie utilisée en science pour résoudre des problèmes. Elle est axée sur l’appropriation de concepts et de stratégies au moyen notamment de la démarche expérimentale. » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 2) ; la C2 *mettre à profit ses connaissances en physique* « porte sur l’analyse de phénomènes ou d’applications. Les élèves sont ainsi amenés à examiner des phénomènes ou des applications et à s’approprier les concepts de physique qui permettent de les comprendre et de les expliquer. » (*Ibid.*, p. 2) ; la C3 *communiquer sur des questions de physique à l’aide des langages utilisés en science et en technologie* « fait appel aux divers langages propres à la discipline et essentiels au partage d’information, de même qu’à l’interprétation et à la production de messages à caractère scientifique et technologique. » (*Ibid.*, p. 2).

de mettre en relation » (Gouvernement du Québec, 2009, p. 22). Ces concepts se réfèrent à plusieurs concepts de cinématique comme ceux de position, de distance, de déplacement, de trajectoire, de vitesse (moyenne et instantanée), de variation de vitesse, d'accélération (moyenne et instantanée). Ils se réfèrent également à des concepts de la physique d'autres domaines, notamment de la dynamique, ou à des concepts mathématiques comme celui de vecteur. Les concepts prescrits de cinématique sont présentés dans la **figure 2**. Quant aux démarches, nous référerons plus particulièrement à la démarche de modélisation dans laquelle les élèves sont engagés pour la construction des modèles et qui fait partie des démarches à caractère scientifique et technologique à leur faire apprendre en lien avec la première compétence disciplinaire d'ordre méthodologique *Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique*. Cette démarche vise la construction de concepts prescrits (concepts et modèles) et nécessite de la part des élèves de développer et mobiliser plusieurs habiletés intellectuelles et techniques.

### 3.2 Le comment enseigner ce qui sera enseigné

Le *comment enseigner ce qui sera enseigné* renvoie à la manière dont les savoirs disciplinaires (concepts prescrits et démarches) sont abordés dans les pratiques d'enseignement des enseignants. Il s'agit de décrire et caractériser les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en vue de les relier aux apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique. Rappelons que cet objectif s'inscrit dans l'esprit des évaluations menées à l'échelle internationale qui portent sur la relation entre les pratiques d'enseignement des enseignants et les performances des élèves en sciences, technologies et mathématiques (Fischer *et al.*, 2005 ; Hiebert *et al.*, 2003 ; Martin, 2010 ; Roth *et al.*, 2006 ; Stigler et Hiebert, 2009 ; Stigler, Gonzales, Kawanaka, Knoll et Serrano, 1999)<sup>78</sup> et dans la continuité d'un grand nombre de travaux qui ont mis en évidence la relation forte entre les pratiques d'enseignement et la compréhension

---

<sup>78</sup> À titre d'exemple, soulignons ici l'étude à grande échelle menée par Stigler, Gonzales, Kawanaka, Knoll et Serrano (1999) qui comportait un échantillon de 231 classe de mathématique de la 8<sup>e</sup> année : 100 en Allemagne, 50 au Japon et 81 aux États-Unis d'Amérique. Les résultats de cette étude ont « reveal[ed] a number of differences in instructional practices across the three cultures. These differences fall into four broad categories: (1) How lessons are structured and delivered ; (2) What kind of mathematics is presented in the lesson ; (3) What kind of mathematical thinking students are engaged in during the lesson ; and (4) How teachers view reform. » (Stigler *et al.*, 1999, p. 6-7).

conceptuelle des élèves en lien avec divers apprentissages disciplinaires (Buty *et al.*, 2004 ; Givry, 2003 ; Kelly, 2011 ; Malkoun, 2007 ; Niedderer *et al.*, 2005, 2007 ; Roth *et al.*, 2006, 2011 ; Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a, 2008). Notre cadrage méthodologique fournit les concepts méthodologiques nécessaires à l'analyse du *comment enseigner ce qui sera enseigné*, soient la chronogénèse, la topogénèse et la mésogénèse qui sont articulés à trois échelles du temps didactique : macroscopique, mésoscopique et microscopique.

### 3.2.1 *La chronogénèse, la topogénèse et la mésogénèse pour caractériser les pratiques d'enseignement aux échelles macroscopique, mésoscopique et microscopique*

L'analyse des pratiques d'enseignement peut se faire à plusieurs échelles de temps (Mercier, Schubauer-Leoni, Donck et Amigues, 2005 ; Tiberghien et Buty, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien et Sensevy, 2012). Pour notre part, nous caractérisons les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation aux trois échelles du temps didactique (les échelles macroscopique, mésoscopique, microscopique) (Tiberghien et Malkoun, 2007).

Pour caractériser les pratiques à ces trois échelles de granularité, nous recourons aux concepts de chronogénèse, topogénèse et mésogénèse (Sensevy et Mercier, 2007) proposés par la didactique française des mathématiques. Succinctement, la *chronogénèse* se réfère à la genèse du temps didactique et recouvre le phénomène d'évolution dans le temps du savoir enseigné dans la classe résultant des transactions successives entre les acteurs. La *topogénèse*, c'est-à-dire la genèse des positions dans la classe, recouvre la part de chacun des acteurs dans l'action conjointe. Cette part évolue et ne peut se comprendre sans la prise en compte de l'environnement dans lequel l'action se réalise. La *mésogénèse*, c'est-à-dire la genèse du milieu didactique, recouvre l'environnement incluant les composantes matérielles de la situation dans laquelle les acteurs agissent. Elle permet de décrire le processus par lequel l'enseignant et les élèves organisent ou réorganisent le milieu. Les concepts de chronogénèse, topogénèse, mésogénèse évoluent de concert : « À chaque état de la mésogénèse correspond un état de la topogénèse et un état de la chronogénèse au regard des savoirs en jeu » (Amade-Escot et Venturini, 2009, p. 29). Leur évolution est liée au contrat didactique qui peut être considéré comme un système essentiellement implicite d'attentes mutuelles entre l'enseignant et les élèves, d'habitudes conjointes ou encore d'attribution mutuelle

d'intentions, à propos d'un savoir en jeu. Ce dernier évoluant au cours du temps, le contrat évolue, donnant lieu à une série de ruptures, à l'initiative de l'enseignant et des élèves.

### 3.2.2 *L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique*

L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique qui est de l'ordre de la séquence d'enseignement permet de se donner une vision globale des savoirs disciplinaires en jeu dans les séquences d'enseignement, ceci pour l'ensemble des séances. Cette analyse conceptuelle permet de dégager la structure du savoir à un niveau de granularité relativement élevé (Malkoun, 2007 ; Seck, 2007). Elle consiste à mettre en évidence les groupes de savoirs du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire mobilisés dans les séquences d'enseignement en donnant des indications sur le nombre total de facettes de savoir<sup>79</sup> et la fréquence d'apparition totale des ces facettes pour chacun de ces groupes. Plus précisément, elle consiste à situer les laboratoires mis en œuvre au sein des séquences et les groupes de savoirs mobilisés au sein de ces laboratoires. Les résultats de cette analyse sont présentés sous la forme d'un réseau conceptuel.

### 3.2.3 *L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique*

L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique qui est de l'ordre de la dizaine de minutes ou de l'heure permet de se donner une idée de la manière avec laquelle les savoirs disciplinaires structurent chacune des séances au moyen d'indicateurs d'ordre mésoscopique (Roth *et al.*, 2006 ; Seck, 2007 ; Seidel, Prenzel et Kobarg, 2005 ; Sensevy et Mercier, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2008). Elle correspond à ce que Seck (2007, p. 92) appelle « les formes de mise en scène dans une classe pouvant caractériser la classe en termes de la chronogénèse (progression du savoir), de topogénèse (position des acteurs par rapport à cette progression) et de contrat ». Dans notre étude, cette analyse implique la construction de synopsis des séances structurés autour de cinq variables mésoscopiques : les phases (problématiser, planifier, investiguer, conceptualiser et déployer) de la démarche de modélisation en référence avec celle que

---

<sup>79</sup> Nous définissons ce concept plus loin.



nous avons développée dans le cadre conceptuel (**figure 8**), les thèmes et sous-thèmes disciplinaires abordés dans la séquence, leurs contextes de traitement (théorie, exercices, laboratoires, etc.), les ressources didactiques utilisées (notes de cours, manuel scolaire, cahier d'exercices, feuilles d'exercices, document de laboratoire, rapport de laboratoire, etc.) et les modalités d'organisation de la classe (en grand groupe, en équipe, individuellement).

### 3.2.4 *L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique*

L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique qui est de l'ordre de la seconde ou de la minute permet de se donner une vision détaillée de la manière avec laquelle les savoirs disciplinaires circulent dans les pratiques d'enseignement. L'échelle microscopique est celle « des énoncés et des gestes des personnes » (Tiberghien *et al.*, 2007a), ce que Buty, Badreddine et Régnier (2012) l'appellent le « temps interactionnel ». Plus précisément, il s'agit de voir comment se manifeste la modélisation des phénomènes par des facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b) formulées par l'enseignant, les élèves ou conjointement par ces deux acteurs au moyen des tâches épistémiques<sup>80</sup> (Collins et Ferguson, 1993 ; Ohlsson, 1996) visant à caractériser les processus de pensée en jeu dans la compréhension du monde matériel tout au long des séquences d'enseignement. L'analyse à l'échelle microscopique est celle qui permet de caractériser plus particulièrement la relation entre l'enseignement et les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Elle est donc centrale pour notre deuxième volet d'analyse : celui de la mise en relation des pratiques d'enseignement avec les acquisitions conceptuelles chez les élèves.

#### 3.2.4.1 *L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des facettes de savoir*

Comme nous l'avons souligné précédemment, la compréhension des phénomènes en physique ne se manifeste pas uniquement lors de l'énonciation des définitions formelles des savoirs disciplinaires par l'enseignant, mais tout au long de la séquence d'enseignement par des énoncés formulés par l'enseignant et les élèves, ce que certains auteurs désignent par l'expression « facettes

---

<sup>80</sup> Nous définissons ce concept plus loin.

de savoir » (« Facet of knowledge ») (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a). Dans le cadre conceptuel, nous avons défini et exemplifié les quatre catégories de facettes de savoir retenues (Galili et Hazan, 2000 ; Malkoun, 2007 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a) : les facettes de savoir conceptuelles, procédurales, symboliques et langagières. Ci-après, nous décrivons la procédure d'analyse pour dégager ces facettes formulées par les acteurs de la classe à travers leurs discours et gestes tout au long des séquences d'enseignement.

### 3.2.4.2 L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des tâches épistémiques

L'introduction des facettes de savoir en physique se fait au moyen de tâches épistémiques (Collins et Ferguson, 1993 ; Ohlsson, 1996) visant à caractériser les processus de pensée en jeu dans la compréhension du monde matériel tout au long des séquences d'enseignement. Dans ses travaux, Ohlsson (1996) s'est inspirée de ce que Collins et Ferguson (1993, p. 25) appellent les jeux et les formes épistémiques : « Les formes épistémiques sont des structures cibles qui guident l'enquête. Les jeux épistémiques sont des stratégies générales pour analyser les phénomènes qui s'inscrivent dans une forme épistémique particulière. »<sup>81</sup>. Nous considérons que l'activité de modélisation du monde matériel constitue le fonctionnement essentiel de la physique et que la modélisation des phénomènes physiques, dans la communauté de savants ou à l'école, implique des processus continus mettant en relation des objets du « monde des théories et des modèles » (MTM) et des objets du « monde des objets et des événements » (MOE) (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien, Veillard, Le Maréchal, Buty et Millar, 2001 ; Tiberghien et Vince, 2005) (**figures 6 et 7**). Ce positionnement épistémologique sur la modélisation auquel nous adhérons pour analyser les tâches épistémiques en jeu dans les pratiques d'enseignement a des conséquences méthodologiques importantes sur la nature des tâches épistémiques considérées. Il nous conduit à restreindre ces tâches épistémiques à celles en jeu dans la compréhension du monde matériel, aussi bien au niveau des situations matérielles qu'au niveau des énoncés théoriques ou entre les deux, au niveau du modèle.

---

<sup>81</sup> Traduction libre: « Epistemic forms are target structures that guide inquiry. Epistemic games are general purpose strategies for analyzing phenomena in order to fill out a particular epistemic form. » (Collins et Ferguson, 1993, p. 25)

Sur le plan opérationnel, nous distinguons donc trois grandes catégories de tâches épistémiques selon leur rapport au monde : 1) Les *tâches épistémiques portant sur le MOE* et qui visent la connaissance et l'usage des objets matériels ( ex. : décrire du matériel ou un protocole de laboratoire) et la maîtrise des actions (ex. : simuler un phénomène, sélectionner une procédure de recueil de données pertinentes) réalisées sur des événements pertinents recouvrant les phénomènes physiques à l'étude<sup>82</sup> ; 2) Les *tâches épistémiques portant sur le MTM* et qui visent la connaissance des objets théoriques, c'est-à-dire les constructions abstraites comme les concepts ou les modèles qui permettent d'étudier des situations matérielles, et qui sont reliés les uns aux autres par des relations, principes, règles et lois du monde des théories et des modèles ; 3) Les *tâches épistémiques mettant en relation le MOE et le MTM* et qui visent à établir des relations bidirectionnelles entre les objets du MOE et les objets du MTM. Dans la méthode d'analyse des données, nous définissons ces trois grandes catégories de tâches épistémiques selon leur rapport au monde et nous décrivons les procédures d'analyse pour dégager ces tâches et leur prise en charge par les acteurs de la classe en relation avec les facettes de savoir.

### 3.3 Le avec quoi enseigner

Le *avec quoi enseigner* renvoie à l'utilisation des ressources didactiques utilisées par l'enseignant et les élèves. Parmi ces ressources, le matériel didactique produit par les éditeurs<sup>83</sup> de manuels scolaires occupe une place importante dans l'enseignement et l'apprentissage des disciplines scolaires au Québec, puisque celui-ci est reconnu par le MELS en tant qu'outils d'opérationnalisation des programmes d'études (Gouvernement du Québec, 1997, 2007a). Des analyses de pratiques d'enseignement de sciences et technologies menées au CREAS (Hasni *et al.*, 2015 ; Hasni, Bousadra et Roy, 2012) montrent qu'en général, le matériel didactique est fortement utilisé par les enseignants, que ce soit pour la planification ou l'enseignement. Ces arguments

---

<sup>82</sup> Par exemple, expérimenter dans une perspective comparative le mouvement d'une balle et chute libre, le mouvement d'une balle suivant une propulsion verticale et le mouvement d'une balle sur un plan incliné pour construire le modèle du MRUA.

<sup>83</sup> Au Québec, les manuels scolaires sont produits par des éditeurs privés. Ceux-ci doivent cependant être conformes aux orientations des programmes d'études et font donc l'objet d'une approbation ministérielle par le Bureau de l'Approbation du Matériel Didactique (BAMD) de ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.

soulignent l'importance de prendre en compte la nature et les modalités d'utilisation des matériels didactiques utilisés par les enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire. Par cette dimension, nous nous intéressons à voir quels matériels didactiques, quelles composantes de ces matériels (guide de l'enseignant, manuel de l'élève, cahier des activités, etc.) et comment ces composantes sont utilisées par les enseignants pour préparer et enseigner leur séquence d'enseignement de cinématique (pour le choix d'un thème, pour la recherche d'informations théoriques, etc.). Par ailleurs, nous en profitons pour questionner les enseignants sur les avantages ou les points forts, ainsi que sur les limites de ces matériels en regard de l'enseignement et de l'apprentissage des modèles et de la modélisation en cinématique. Outre les matériels didactiques, d'autres ressources sont également considérées, parmi lesquelles les documents produits exclusivement par l'enseignant, les ressources imprimées autres que le matériel didactique comme les revues ou les journaux, les ressources ministérielles comme les programmes d'études officiels et la progression des apprentissages<sup>84</sup>, les ressources informatiques, les ressources humaines comme le conseiller pédagogique ou le technicien de laboratoire, etc.

#### **4. LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE**

La dimension organisationnelle se réfère à l'étude des contextes dans lesquels se fait l'enseignement des modèles et de la modélisation. Elle consiste à dégager les défis et les difficultés, du côté de l'enseignant et du côté des élèves, associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation en classe de physique. Il s'agit aussi de dégager les facteurs qui facilitent ou entravent l'enseignement et l'apprentissage de ces objets d'étude en classe. Ces défis et facteurs peuvent être associés à la nature des contenus disciplinaires (beaucoup de contenus, contenus abstraits, etc.), aux caractéristiques intrinsèques des élèves (niveau de compréhension, motivation, engagement des élèves dans les tâches à réaliser, etc.), à la compréhension ou la réalisation des tâches associées à la démarche de modélisation par les élèves, à l'attitude des élèves face aux tâches associées à la démarche de modélisation, à la gestion de l'aide apportée aux élèves, aux compétences professionnelles des enseignants, aux contextes de travail particuliers (disposition de

---

<sup>84</sup> La progression des apprentissages au secondaire constitue un complément à chaque programme disciplinaire en apportant des précisions sur les connaissances que les élèves doivent acquérir et être capables d'utiliser chaque année du secondaire. Il s'agit d'un outil qui est mis à la disposition des enseignants pour les aider à planifier leur enseignement et les apprentissages que doivent faire leurs élèves.

la classe, espace disponible, etc.), à la disponibilité de ressources particulières (matériel, temps, etc.), à la nature du programme de physique (surcharge, non-clarté, etc.), à l'aspect de nouveauté des contenus disciplinaires (différence avec ce qui est habituellement fait en classe), etc.

## 5. LES QUESTIONS SPÉCIFIQUES DE RECHERCHE

Des dimensions conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle et organisationnelle du cadre d'analyse découlent cinq questions spécifiques de recherche pour décrire et caractériser les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en vue de les relier aux apprentissages conceptuels des élèves dans le domaine de la cinématique.

Question spécifique de recherche 1 : *Quelles significations les enseignants attribuent-ils aux modèles et à la démarche de modélisation ?*

Question spécifique de recherche 2 : *Quelles sont les finalités éducatives poursuivies par les enseignants dans l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?*

Question spécifique de recherche 3 : *Comment s'opérationnalisent l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation dans les pratiques d'enseignement des enseignants aux échelles de temps didactique macroscopique, mésoscopique et microscopique ?*

Question spécifique de recherche 4 : *Quels sont les défis, les difficultés, ainsi que les facteurs facilitant ou entravant l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?*

Question spécifique de recherche 5 : *Quel potentiel ces pratiques offrent-elles pour la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique, en particulier en cinématique ?*

## QUATRIÈME CHAPITRE : LA MÉTHODOLOGIE

Cette recherche consiste en une étude exploratoire descriptive visant à caractériser et comparer les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation chez des enseignants de physique du secondaire qui abordent dans leur séquence d'enseignement des contenus disciplinaires similaires : ceux associés à la cinématique. Elle s'inscrit dans la même perspective que les travaux de Tiberghien (Tiberghien, Malkoun et Seck, 2008 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) qui visent à comparer « la pratique de classes de même niveau et dont l'enseignement porte sur les mêmes contenus. Cette différenciation suppose de caractériser les potentialités respectives des classes de favoriser l'apprentissage d'une majorité d'élèves. La perspective est de mettre en relation ces caractéristiques avec les acquisitions des élèves du point de vue du savoir (au sens large incluant les savoir-faire et l'épistémologie) » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 77). Dans un premier volet d'analyse, il s'agit de caractériser la singularité des pratiques d'enseignement du point de vue des actions conjointes de l'enseignant et des élèves dans leur complexité multidimensionnelle, et ce, de manière à mettre plus particulièrement en évidence leur potentiel sur l'engagement des élèves dans les processus de modélisation et sur la compréhension des phénomènes de la physique. Dans un second volet d'analyse, il s'agit de relier les caractéristiques de ces pratiques d'enseignement aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique.

Les analyses à effectuer pour caractériser ces pratiques à trois échelles du temps didactique nécessitent de recourir à un nombre important d'indicateurs d'ordre mésoscopique et microscopique. Elles commandent une approche de recherche dont la visée est la description approfondie d'un phénomène. Pour répondre à un tel objectif, l'étude de cas est une méthode particulièrement appropriée pour étudier de manière approfondie le phénomène d'enseignement-apprentissage des modèles et de la modélisation dans un milieu écologique qu'est la classe de physique : « L'étude de cas illustre particulièrement le souci de rendre compte de la complexité d'un phénomène, en mettant l'accent sur le caractère naturel, holistique, phénoménologique de l'approche » (Moscovici et Buschini, 2003, p. 158). Plus particulièrement, nous recourons à une étude de cas multiples (Gagnon, 2012 ; Stake, 1995, 2005), c'est-à-dire une étude collective et simultanée de plusieurs cas pour cerner un même phénomène, celui de l'enseignement-

apprentissage des modèles et de la modélisation en classe de physique. Dans ce type d'étude, « on suppose que le cas pour être compris, la connaissance d'autres cas, mais l'on se concentre alors sur chacun des cas, pris dans sa singularité, avant de procéder à leur comparaison. » (Moscovici et Buschini, 2003, p. 159). La visée poursuivie est la théorisation idéographique des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation avec comme perspective de « travailler à la construction de modèles de la pratique susceptibles de fournir un cadre de lecture des pratiques enseignantes » (Bru, 2002, p. 68) à plus grande échelle, mais sans avoir une intention de généralisation des résultats. Contrairement à la théorisation nomothétique qui permettrait de tirer des lois générales et universelles relatives aux pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à partir de cas étudiés, la théorisation idéographique repose sur une description singulière des pratiques d'enseignement dans leur contexte, sans prétendre à la généralisation des résultats.

Dans cette étude de cas multiples à visée exploratoire et descriptive, c'est la description par les dimensions conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle et organisationnelle d'un même phénomène d'enseignement-apprentissage et la triangulation des données issues de sources diversifiées (entrevues préenregistrement, entrevues postenregistrement, enregistrements vidéos en classe, artefacts de classe, etc.) qui permettent de rendre compte de la multidimensionnalité des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation. Comme l'explique Van der Maren (1996, p. 191), la recherche exploratoire descriptive a pour but de « générer des hypothèses, c'est-à-dire d'examiner un ensemble de données afin de découvrir quelles relations peuvent être observées, quelles structures peuvent y être construites ».

Comme nous l'avons mis en évidence dans la problématique, la documentation scientifique qui s'intéresse à l'éducation scientifique et technologique pour la dernière décennie montre une absence de travaux sur les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation chez des enseignants de physique du secondaire dans le domaine de la cinématique, ce qui laisse donc une zone d'ombre importante à explorer quant à la manière dont les enseignants se saisissent de ces objets d'étude au cœur du fonctionnement du savoir en physique (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1973 ; Tiberghien, 1994).

## **1. LA CONSTRUCTION DE L'ÉCHANTILLON**

### **1.1 La stratégie d'échantillonnage**

Notre intention étant de caractériser les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation d'enseignants, cela a des conséquences importantes sur la stratégie d'échantillonnage adoptée pour la sélection des participants. Si la stratégie d'échantillonnage n'est pas une stratégie probabiliste visant la construction d'un large échantillon statistiquement représentatif de la population des enseignants québécois de physique en considérant une multitude de variables possibles, elle ne consiste pas non plus en une stratégie d'échantillonnage accidentelle visant à recruter des enseignants facilement accessibles (par exemple, qui font partie exclusivement de notre réseau de connaissances professionnelles), cette stratégie étant très courante dans les études de cas. Dans notre cas, le recours à cette stratégie aurait pu avoir comme conséquence de recruter des enseignants dont la planification de l'enseignement des modèles et de la modélisation est similaire en raison de leur proximité, ou au pire de recruter des enseignants qui recourent très peu aux modèles et à modélisation dans leur enseignement de la physique. La stratégie d'échantillonnage que nous adoptons est l'échantillonnage par choix raisonné (Fortin, 1996 ; Freyssinet-Dominjon, 1997 ; Gagnon, 2012 ; Van der Maren, 1996). Cette stratégie vise la diversité quant à la représentativité de la population au sens sociologique, plutôt qu'au sens proportionnel du terme (Freyssinet-Dominjon, 1997). Nous avons sélectionné les participants sur la base de quelques critères sociologiquement pertinents de la représentativité des enseignants de physique, même si notre échantillon s'avère restreint. L'ampleur des analyses à effectuer nous a conduit à ne retenir que deux enseignants parmi un échantillon de cinq enseignants volontaires souhaitant participer à notre étude. La sélection de ces deux enseignants a été faite sur la base des trois critères suivants.

1. L'appartenance des enseignants à la communauté d'enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui enseignent dans une école secondaire québécoise.



2. La possibilité offerte par les enseignants d'engager les élèves dans des démarches d'enseignement-apprentissage visant la modélisation de phénomènes dans le domaine de la cinématique. Au moment du recrutement, nous avons demandé aux enseignants intéressés si à certains moments de leur séquence d'enseignement, les élèves ont l'occasion de recueillir et analyser des faits scientifiques en relation avec divers phénomènes de cinématique. Par ce critère, nous avons éliminé deux enseignants dont l'enseignement de la cinématique se fait exclusivement par l'enseignement magistral et la résolution de problèmes mathématiques.

3. La diversité des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation. Comme notre intention est de comparer des pratiques d'enseignement ordinaires portant sur les mêmes contenus disciplinaires en vue de caractériser leurs potentialités respectives sur les acquisitions conceptuelles des élèves, cela nous a conduit à sélectionner des enseignants dont les pratiques d'enseignement se distinguent quant à la manière d'aborder ces contenus avec leurs élèves. Au moment du recrutement, nous avons demandé aux enseignants intéressés de nous fournir une planification sommaire du déroulement général de leur séquence d'enseignement en indiquant les thèmes disciplinaires et le nombre de séances prévues pour aborder chacun de ces thèmes en classe ou en laboratoire. Pour faire suite à la réception des planifications, nous avons conduit des entrevues téléphoniques auprès de quatre enseignants afin d'obtenir des informations plus précises sur les modalités d'enseignement de deux thématiques inscrites au programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire : le mouvement rectiligne uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré, qui sont riches en matière de modélisations possibles. Par ce critère, nous avons éliminé un enseignant dont la modalité d'enseignement de ces deux thématiques est presque identique à celle de ses collègues.

Cette stratégie d'échantillonnage nous a donc permis de sélectionner deux enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (qui enseignent à des élèves âgés de 16 ans, ce qui correspond au secondaire supérieur en Europe) parmi cinq candidats potentiels. Ces deux enseignants ont été retenus sur la base des écarts constatés dans leurs pratiques d'enseignement déclarées lors de l'entrevue téléphonique, et ce, dans l'intérêt de voir si éventuellement des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation produisent des effets différents chez les élèves en matière de prise en charge des modèles et d'acquisitions conceptuelles. La description de la

séquence d'enseignement de cinématique faite par l'enseignante 1 lors de l'entrevue téléphonique laissait présager que les démarches d'enseignement-apprentissage conduites par cette enseignante sont davantage centrées sur la transmission du savoir par l'enseignante et le manuel scolaire et qu'elle privilégie l'engagement des élèves dans des laboratoires dont l'objectif est de valider les modèles en jeu, en l'occurrence ceux du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Quant à la description de la séquence d'enseignement de cinématique faite par l'enseignant 2, elle laissait présager que les démarches d'enseignement-apprentissage conduites par cet enseignant pour la modélisation des phénomènes de cinématique s'inscrivent davantage dans une logique constructiviste où les modèles sont construits sur la base des données issues de situations expérimentales.

Soulignons enfin que la faible taille de notre échantillon n'invalide pas la scientificité de notre recherche. Comme le soulignent (Quivy et Campenhoudt, 2006, p. 150), le critère de la représentativité en sciences humaines n'est pas toujours possible en précisant qu'il « ne faut pas confondre scientificité et représentativité ». Ils expliquent que dépendamment des objets d'études, trois possibilités s'offrent au chercheur en sciences humaines : 1) étudier la totalité de la population ; 2) étudier un échantillon représentatif de la population ; 3) étudier des composantes non strictement représentatives, mais caractéristiques de la population. Dans le cas de notre recherche, c'est la troisième option qui s'applique.

## **1.2 Le processus de recrutement des enseignants**

Au début du processus de recrutement, tous les enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui enseignent dans les écoles secondaires de deux commissions scolaires de la région administrative de Québec et Chaudière-Appalaches ont été interpellés par leurs conseillers pédagogiques de sciences et technologies respectifs. Ces conseillers ont transmis aux enseignants, par courriel et par téléphone, des informations sommaires sur notre projet de recherche et ont recueilli les noms des personnes qui étaient intéressées. Comme nous l'avons souligné précédemment, cinq enseignants volontaires se sont manifestés pour participer à notre étude et l'application de la stratégie d'échantillonnage par choix raisonné a conduit à la sélection de deux enseignants. Nous avons

convenu d'une rencontre avec chacun d'eux afin de les informer de manière plus approfondie sur les différents aspects de la recherche (les objectifs général et spécifiques de la recherche ; les modalités de recueil des données ; les avantages et inconvénients associés liés à leur participation ; les aspects déontologiques, etc.). Ces aspects sont en grande partie énoncés dans la lettre d'information et le formulaire de consentement pour les enseignants ([annexe 3](#)). Cette rencontre nous a permis de créer un lien de confiance avec les enseignants et de confirmer leur participation officielle en signant le formulaire de consentement. Ce sont les enseignants qui par la suite se sont chargés d'informer leurs élèves des objectifs et du déroulement de la recherche et qui ont fait le suivi auprès des élèves pour la signature du formulaire de consentement pour les personnes mineures (consentement parental) ([annexe 4](#)).

### **1.3 Les caractéristiques de l'échantillon**

Notre échantillon se compose de deux enseignants intervenant dans des classes ordinaires d'écoles secondaires de la région de Québec-Chaudière-Appalaches qui se situent dans des milieux socioéconomiques moyens. L'enseignante 1 est de sexe féminin et a 15 années d'expérience en enseignement des sciences, alors que l'enseignant 2 est de sexe masculin et a 30 années d'expérience en enseignement des sciences. Les deux enseignants détiennent un baccalauréat en enseignement au secondaire. Pour des raisons de confidentialité, nous avons volontairement omis de mentionner d'autres détails complémentaires qui pourraient mener à leur identification. Le même principe a été observé lorsque nous citons intégralement les propos des sujets (enseignant ou élèves) en classe ou lors des entrevues préenregistrement et postenregistrement.

## **2. LES PROCÉDURES DE RECUEIL DES DONNÉES**

Quatre procédures de recueil de données ont été retenues afin de décrire et comparer les pratiques d'enseignement ordinaires d'enseignants de physique en vue de mettre en évidence leurs potentialités sur l'engagement des élèves dans les processus de modélisation et de les relier aux acquisitions conceptuelles de ces mêmes élèves dans le domaine de la cinématique : 1) les entrevues pré et postenregistrement réalisées avant et après les enregistrements vidéos en relation avec les

phases préactive et postactive de la pratique d'enseignement ; 2) les enregistrements vidéos des séquences d'enseignement de cinématique concernant la phase interactive de la pratique d'enseignement ; 3) les artéfacts de classe (planification d'enseignement, productions écrites des élèves, etc.) ; 4) le questionnaire d'enquête visant à mesurer les connaissances conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique au terme des séquences d'enseignement.

Afin de faciliter la compréhension du lecteur, nous présentons de manière linéaire, dans les paragraphes qui suivent, chacune de ces procédures de recueil de données en explicitant le rationnel de leur choix, ainsi que leurs apports et leurs limites en fonction des intentions poursuivies dans notre recherche.

## **2.1 Les entretiens pré et postenregistrement**

La réalisation d'entretiens pré et postenregistrement avant et après les enregistrements vidéos en classe repose sur un choix théorique et méthodologique important : prendre en considération lors de l'analyse des pratiques d'enseignement autant le point de vue de l'observateur externe – le chercheur, en s'appuyant sur les enregistrements en classe – que le sens que les enseignants accordent à leurs actions (Hasni *et al.*, 2015 ; Hasni, Bousadra et Roy, 2012). Comme nous l'avons souligné précédemment, la pratique d'enseignement consiste en une activité professionnelle qui s'organise en fonction de finalités éducatives socialement déterminées par la culture, ainsi que par les contenus et les orientations curriculaires. La pratique de l'enseignant se traduit par Altet (2002, p. 86) comme « une activité professionnelle située, orientée par des fins, des buts et les normes d'un groupe professionnel. Elle se traduit par la mise en œuvre des savoirs, procédés et compétences en actes d'une personne en situation professionnelle. » En ce sens, les enseignants interprètent leurs rôles, leur manière d'enseigner, etc. en fonction de leur propre cadre de référence expérientiel et représentationnel (Vincent, Garnier et Marinacci, 2006) qu'il est important de considérer. Si nous ne considérons pas que toutes les actions des enseignants soient rationalisées et prévues, nous pensons cependant que les enseignants sont des professionnels qui « anticipent à des degrés variables leurs interventions, notamment sur les plans des visées éducatives, des contenus à faire apprendre, du déroulement du cours et des ressources matérielles à utiliser

(incluant les ressources didactiques) » (Hasni *et al.*, 2015, p. 202) et qu'il « est par conséquent important d'analyser les pratiques observées (les enregistrements), tout en tenant compte de ce rationnel » (*Ibid.*, p. 202). Cela nous conduit à appréhender la pratique d'enseignement de l'enseignant comme étant une construction effectuée par le chercheur sur la base de la pratique déclarée (celle inférée à partir des entrevues pré et postenregistrement réalisées avant et après les enregistrements vidéos en classe) et de la pratique observée (celle inférée à partir des enregistrements vidéos) (**figure 19**). Autrement dit, les données issues des entrevues pré et postenregistrement sont des données complémentaires à celles obtenues par les enregistrements vidéos pour éclairer l'analyse des pratiques d'enseignement (Lenoir *et al.*, 2007 ; Lenoir, Larose, Deaudelin, Kalubi et Roy, 2002 ; Lenoir et Vanhulle, 2006).

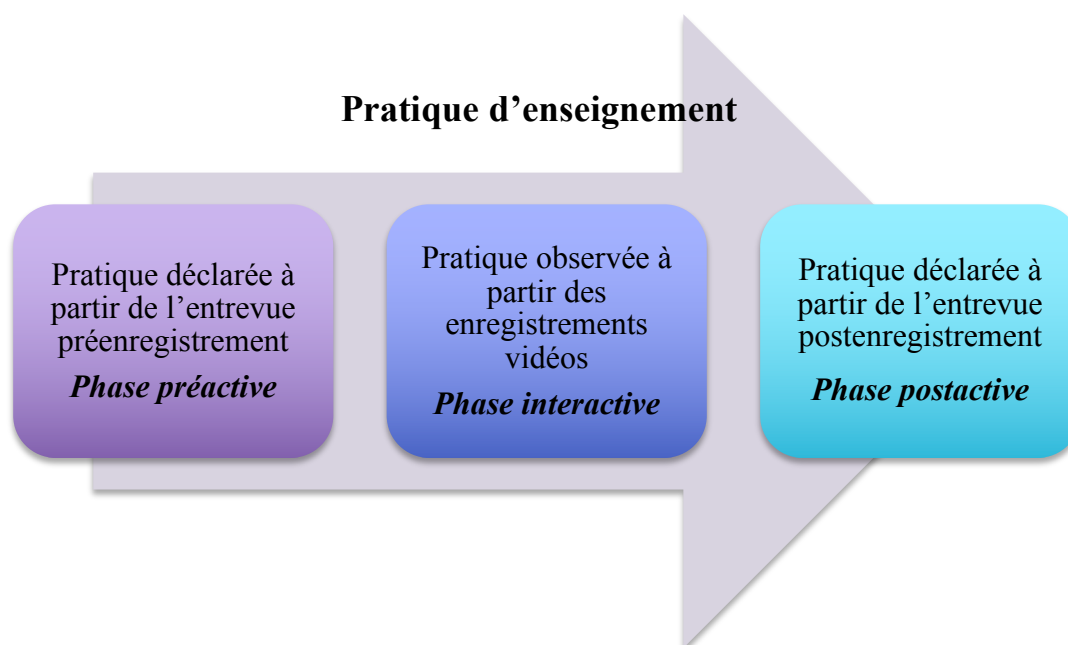


Figure 19- La pratique d'enseignement : une construction du chercheur sur la base de la pratique déclarée et de la pratique observée

Le type d'entrevue qui a été retenu est l'entrevue semi-structurée. Sur le plan méthodologique, cette entrevue se situe à mi-chemin entre l'entrevue structurée qui accorde très peu de souplesse au chercheur dans la conduite des questionnements et l'entrevue non structurée (aussi appelé entretien en profondeur ou entretien libre) qui laisse une grande liberté aux participants de s'exprimer sur les thématiques sondées (Freyssinet-Dominjon, 1997 ; Moscovici et Buschini, 2003). L'entrevue semi-structurée offre le degré de flexibilité voulu, tant sur le plan de

la formulation des questions que sur l'ordre dans lequel celles-ci peuvent être posées. Elle permet de poser des questions générales et plus nuancées, des questions visant l'éclaircissement, la reformulation ou l'approfondissement de la pensée, et ce, afin de mieux accéder à la compréhension qu'ont les enseignants des modèles et de la modélisation. Ainsi, les guides sur lesquels nous nous sommes appuyés pour réaliser nos entrevues ont été davantage pensés comme des canevas de thèmes et de questions possibles pouvant être abordées à un moment approprié lors de la conduite des ces entrevues, et ce, de manière à être à élargir la possibilité aux enseignants de s'exprimer sur les objets et les enjeux de savoir en lien avec nos intentions de recherche. À l'instar de Freyssinet-Dominjon (1997, p. 158-160), les guides d'entrevue, lorsqu'ils sont pensés en ce sens, ne consistent pas en un carcan procédural rigide à suivre au pied de la lettre, mais plutôt en une « carte au sens géographique du terme, marquant les points de passage sans les directives particulières sur la façon de s'y rendre. Son utilisation n'est source de contrainte, ni pour l'enquête qui n'en a ordinairement pas la connaissance dans le détail ni pour l'enquêteur qui en adapte l'utilisation aux circonstances variables d'un entretien à l'autre. ».

De manière à ce que les entrevues pré et postenregistrement puissent permettre de recueillir des informations qui reflètent davantage ce qui se passe en classe, et non pas un discours général sur ce qui pourrait se passer, ces entrevues ont été conduites en tenant compte des cinq orientations suivantes (Hasni *et al.*, 2015 ; Hasni, Bousadra et Roy, 2012).

- Pour accéder à un maximum d'informations concernant les contenus et le déroulement des séances enregistrées, les entrevues ont été menées le plus proche possible du moment de l'enregistrement en classe, soit à l'intérieur de deux jours, le plus souvent la veille ou quelques heures avant la mise en œuvre des séances en classe.
- Les questions des entrevues sont orientées vers les actions concrètes de l'enseignant et des élèves prévues et sur leur justification en lien avec les apprentissages des élèves.
- Plusieurs entrevues préenregistrement et postenregistrement (une entrevue pour environ un maximum de 3 séances) ont été réalisées sur la séquence de manière à laisser aux enseignants le temps de réajuster graduellement leur planification selon la progression des apprentissages des

élèves, d'une part, et de manière à ce que les entrevues puissent nous fournir des informations suffisamment détaillées sur le déroulement des séances sur un temps raisonnable, en visant une durée maximale de 50 minutes pour les entrevues préenregistrement et de 15 minutes pour les entrevues postenregistrement.

- Pour se rapprocher davantage des pratiques d'enseignement dites ordinaires des enseignants (ce que les enseignants font habituellement en classe), aucun appui particulier ne leur a été apporté quant à la planification de leur séquence d'enseignement (contenu, déroulement, etc.). Les planifications proposées par les enseignants s'inscrivaient dans le déroulement normal de leur programmation annuelle. Nous ne leur avons pas demandé de réorganiser leur planification annuelle afin de répondre à des attentes particulières de notre recherche. Cependant, même si nous savons qu'en général les enseignants ne recourent pas systématiquement à des planifications écrites dans leur enseignement, nous leur avons demandé à la fin des entrevues préenregistrement s'ils disposaient d'une planification écrite de leur séquence d'enseignement et s'ils acceptaient, le cas échéant, de nous la fournir afin que nous puissions trianguler cette source de données avec les entrevues préenregistrement et postenregistrement.

- D'autres mesures ont également été prises. Avant la réalisation de ces entrevues, nous avons préparé psychologiquement les participants de manière à ce qu'ils puissent nous fournir un maximum d'information au moment de la réalisation des entrevues. Lors de la rencontre d'information sur le projet de recherche, au moins deux semaines avant le début du recueil des données, les enseignants ont été informés sur divers points concernant ces entrevues par exemple, le rationnel des choix qui justifient le recours aux entrevues, les principales thématiques qui structurent les guides d'entrevue (ce qui leur a permis de se préparer cognitivement aux types de questions posées), le nombre approximatif d'entrevues à réaliser, la durée approximative des entrevues, leur rôle et celui du chercheur dans la réalisation des entrevues, le respect de la confidentialité des données, etc. Afin de s'assurer d'une plus grande fluidité de l'information transmise au chercheur au moment de la réalisation des entrevues, nous avons suggéré aux enseignants d'avoir entre les mains la planification du déroulement des séances faisant l'objet d'un enregistrement en classe. Nous pensons qu'un participant préparé est dans de meilleures dispositions pour fournir des réponses pertinentes et éclairées aux questions posées par le

chercheur, et que cette condition ne remet pas en cause le caractère spontané des réponses visé par le chercheur. Par ailleurs, nous nous sommes assurés au préalable de la qualité de l'environnement dans lequel se déroulent les entrevues. Au niveau de l'environnement physique, nous avons sensibilisé les participants sur l'importance de réaliser les entrevues dans un endroit qui permet d'assurer la libre expression et la confidentialité des échanges entre l'enseignant et le chercheur. Nous avons proposé aux enseignants de conduire ces entrevues selon leur convenance, soit en présentiel pendant les heures de travail à l'école, soit par téléphone après les heures de travail à la maison. Pour des raisons de proximité, les entrevues pré et postenregistrement ont été réalisés par téléphone avec l'enseignante 1 et en présentiel avec l'enseignant 2. Au moment de leur réalisation, nous avons adopté une attitude qui permet de favoriser une relation de confiance avec la personne interviewée. Concrètement, nous avons veillé à ce que notre discours soit empreint de trois attitudes spécifiques rapportées fréquemment dans les écrits méthodologiques consacrés aux techniques d'interview (Freyssinet-Dominjon, 1997 ; Moscovici et Buschini, 2003) : l'ouverture, l'empathie et la neutralité. De manière à assurer une uniformité dans le recueil des données, nous avons réalisé nous-mêmes les entrevues pré et postenregistrement. Les données des entrevues pré et postenregistrement ont été enregistrées à l'aide d'un enregistreur audionumérique et transcrites sous forme de verbatim à l'aide du logiciel d'analyse multimédia *Transana*.

Les entrevues préenregistrement, qui correspondent à la phase préactive (Altet, 2001 ; Bru et Talbot, 2001 ; Lenoir, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007) de la pratique d'enseignement, visent à obtenir des données sur ce que les enseignants souhaitent faire en classe. Sur le plan du contenu, la majorité des questions du guide d'entrevue préenregistrement permettent de recueillir des données sur la dimension des pratiques d'enseignement qui est au cœur de notre cadre d'analyse, soit la dimension opérationnelle associée à la question spécifique de recherche : *comment s'opérationnalisent l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation dans les pratiques d'enseignement des enseignants aux échelles du temps didactique macroscopique, mésoscopique et microscopique ?* Sur le plan de la structure, les questions sont réparties selon les trois composantes de cette dimension (Hasni *et al.*, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007) : le *quoi enseigner*, le *comment enseigner ce qui sera enseigné* et le *avec quoi enseigner*. Certaines questions permettent de recueillir également des données sur les trois autres dimensions (conceptuelle, fonctionnelle et



organisationnelle) de la pratique. Dans le guide de l'entrevue préenregistrement présenté à l'**annexe 5**, nous avons mis en évidence les questions associées à chacune de ces trois composantes.

Pour la composante du *quoi enseigner*, nous posons des questions qui permettent aux enseignants de se prononcer sur les savoirs disciplinaires (de la cinématique ou autres) visés dans les séances enregistrées, plus particulièrement ceux associés aux modèles et à la modélisation. De manière à nous assurer que les enseignants décrivent les principaux contenus qu'ils souhaitent faire apprendre aux élèves, nous ne leur demandons pas uniquement de les énoncer, mais de nous préciser ceux qu'ils souhaitent que leurs élèves retiennent au terme de leur séquence d'enseignement. Des questions sont prévues pour distinguer les savoirs disciplinaires qui font l'objet de nouveaux apprentissages et ceux qui font l'objet d'une mobilisation. Ces questions permettent d'obtenir des réponses pour décrire, à une échelle macroscopique, la structure conceptuelle des savoirs disciplinaires en jeu dans les séances enregistrées.

Pour la composante du *comment enseigner ce qui sera enseigné*, nous posons des questions qui permettent aux enseignants de se prononcer sur le déroulement de chacune des séances enregistrées, en général, et sur le déroulement des démarches qui visent de manière spécifique l'acquisition des modèles, en particulier. Ces questions permettent d'obtenir des réponses pour décrire, sur une échelle mésoscopique, les principales tâches réalisées par l'enseignant et les élèves en lien avec les apprentissages visés au cours des séances. Plus précisément, elles permettent d'identifier les moments où les enseignants recourent à une démarche de modélisation, et les principales phases (ou moments forts) de cette démarche.

Pour la composante du *avec quoi enseigner*, nous posons des questions en lien avec les ressources didactiques utilisées par les enseignants dans la préparation et l'enseignement de leurs séances. Les questions portent, d'une part, sur le matériel didactique produit par les éditeurs de manuels scolaires, et d'autre part, sur les autres ressources comme les ressources imprimées autres que les manuels scolaires, les ressources informatiques ou les ressources humaines. Ici, nous nous intéressons à la nature de ces ressources, à la justification de leur choix, à leurs modalités d'utilisation, à leurs apports et leurs limites en regard de l'enseignement et de l'apprentissage des modèles.

En regard de la dimension conceptuelle de la pratique, nous posons des questions qui permettent aux enseignants de formuler leur compréhension de ce qu'est pour eux un modèle et une démarche de modélisation, en insistant sur l'idée d'exposer les principales caractéristiques (les attributs essentiels) de ces concepts. Ces questions sont posées respectivement au terme de chacune des deux premières sections du guide (savoirs disciplinaires en jeu et déroulement de la séquence) afin que les enseignants puissent donner du sens à ces concepts abstraits à partir des exemples qu'ils ont énumérés précédemment. Cette stratégie de questionnement, qui consiste à structurer le questionnement à « partir du concret et du particulier pour aller vers le général et l'abstrait » (Moscovici et Buschini, 2003, p. 156), permet de donner du sens aux questions posées et d'éviter que l'intervieweur et l'interviewé produisent des discours en parallèle en ayant l'impression de parler des langues différentes. Par ailleurs, contrairement aux autres questions, ces questions ne sont posées qu'une seule fois lors de la première entrevue préenregistrement. En regard de la dimension fonctionnelle, nous posons des questions qui permettent aux enseignants de justifier le recours aux modèles et à la démarche modélisation dans les séances enregistrées. Il s'agit ici de voir quelles sont leurs intentions éducatives relatives à l'enseignement de ces objets d'étude. Une fois de plus, les questions posées donnent la possibilité aux enseignants de mettre en relation les exemples de modèles et de démarches qu'ils ont énumérés précédemment et d'appuyer leur argumentation sur ces exemples. Quant à la dimension organisationnelle, nous posons des questions qui permettent aux enseignants de décrire les contextes dans lesquelles se fait l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation. Il s'agit ici de soulever les défis, difficultés, ainsi que les facteurs facilitant et entravant l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation. Les questions posées se réfèrent aux contenus disciplinaires de manière générale, et aux modèles et à la démarche de modélisation, en particulier.

Les entrevues postenregistrement qui correspondent à la phase postactive (Altet, 2001 ; Bru et Talbot, 2001 ; Lenoir, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007) de la pratique d'enseignement visent à obtenir des données sur les actions que les enseignants ont posées en fonction des intentions éducatives retenues (implicites ou explicites) et à justifier leurs actions effectives. Ce guide est composé de questions sur la dimension opérationnelle de la pratique d'enseignement de manière à obtenir une rétroaction « à chaud » de la part de l'enseignant sur les événements marquants ou inattendus qui ont été constatés pendant les séances enregistrées, sur les adaptations (ou changements) qu'ils ont

apportées aux contenus ou au déroulement de ces séances, et sur les apports et limites qu'ils témoignent en regard des ressources didactiques utilisées. Le guide d'entrevue postenregistrement permet également de recueillir des données sur la dimension organisationnelle de la pratique en questionnant les enseignants sur les défis et les difficultés rencontrées lors de l'enseignement-apprentissage des modèles et de la modélisation, ainsi que sur les conditions qui ont permis de faciliter ou qui ont entravé leur enseignement-apprentissage. Le guide de l'entrevue postenregistrement est présenté à l'**annexe 6**.

## **2.2 L'enregistrement vidéo des séquences d'enseignement en classe**

En plaçant au cœur de notre dispositif méthodologique l'observation directe des pratiques d'enseignement, nous considérons nécessaire « d'abandonner la connaissance de la pratique plus spéculative et normative que descriptive et compréhensive » (Bressoux, 2001, p. 43). Cela ne veut pas pour autant dire qu'il s'agit d'abandonner le discours que les enseignants ont sur leurs pratiques. Au contraire, si nous considérons que la pratique d'enseignement est une construction effectuée par le chercheur sur la base de la pratique déclarée (celle inférée à partir des entrevues pré et postenregistrement réalisées avant et après les enregistrements vidéos en classe) et de la pratique observée (celle inférée à partir des enregistrements vidéos) (**figure 19**), l'enregistrement vidéo en classe des séquences d'enseignement est une procédure de collecte de données essentielle pour l'analyse des pratiques d'enseignement. Ainsi, les enregistrements vidéos en classe qui correspondent à la phase interactive (Altet, 2001 ; Bru et Talbot, 2001 ; Lenoir, 2015 ; Lenoir *et al.*, 2007) de la pratique d'enseignement constituent les principales sources de données de notre recherche. Si les enregistrements vidéos en classe sont retenus comme procédure de collecte de données pour plusieurs raisons, au moins six méritent d'être évoquées.

1. Ils permettent de faire une observation à distance des pratiques d'enseignement, et par conséquent, de réduire l'influence que nous pourrions avoir sur les pratiques d'enseignement des enseignants (effet de désirabilité).
2. Ils permettent de garder une trace permanente des discours et gestes de l'enseignant et des élèves en raison du caractère multimodal de la vidéo, ce qui n'est pas ou peu possible avec d'autres

procédures de recueil de données comme l'enregistrement audio, la prise de notes ou les grilles d'analyses des actions des acteurs en situation (Jordan et Henderson, 1995 ; Mondada, 2006).

3. Ils permettent de revisionner les séquences d'enseignement autant de fois qu'il est nécessaire dans la conduite nos analyses (Jordan et Henderson, 1995). Ces revisionnements sont essentiels non seulement pour se donner une meilleure compréhension du déroulement des séances, mais aussi pour raffiner nos questions spécifiques de recherche et préciser nos indicateurs d'analyse des pratiques. Comme le souligne Badreddine (2009), l'enregistrement vidéo améliore de façon considérable la perception de la continuité des discours et gestes de l'enseignant et des élèves sur une séquence d'enseignement de longue durée, comme c'est le cas dans notre étude.
4. Ils permettent de se décharger de l'enregistrement manuel des faits à noter dans le contexte réel de la situation de la classe et de prendre le recul nécessaire à l'observation des faits dans la conduite de nos analyses.
5. Ils permettent la confrontation des évènements dans la conduite des entrevues postanalyses.
6. Ils constituent un outil pour la validation des résultats dans le processus d'accord interjuge.

Nos objectifs étant de décrire et comparer les pratiques d'enseignement ordinaires d'enseignants de physique en vue de mettre en évidence leurs potentialités sur l'engagement des élèves dans les processus de modélisation et de les relier aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique, nous n'avons pas d'autres choix que de filmer l'ensemble des séances d'enseignement qui couvrent ce domaine. Les enregistrements vidéos ont été réalisés par un technicien en audiovisuel sous la conduite d'un protocole ([annexe 7](#)) qui prévoit les modalités d'enregistrement. Nous avons fait part de ce protocole au moins une semaine avant le début de la mise en œuvre des séquences d'enseignement en classe, et nous nous sommes assurés de son respect au début du déroulement des 4 premières séances par des visionnements de contrôle qui ont conduit notamment à certains réajustements dans les modalités d'enregistrement retenues par le technicien.

Si l'enregistrement vidéo des séquences d'enseignement en classe est une procédure de collecte de données présentant de nombreux avantages pour notre projet, cette procédure comporte

néanmoins quelques limites auxquelles il importe d'être attentif. On peut en énumérer au moins quatre.

1. La modification des comportements des acteurs de la classe en présence d'un observateur externe, le cas échéant un technicien en audiovisuel qui a procédé à l'enregistrement des séquences d'enseignement des deux enseignants. Si nous pensons que la présence d'un technicien en audiovisuel pour enregistrer les séquences d'enseignement a moins d'influence sur les pratiques d'enseignement que celle du chercheur<sup>85</sup>, la classe est tout de même contaminée par sa présence et l'appareillage technique (caméra, micro, etc.) qu'il utilise pour le recueil des données, et cela peut avoir des effets non négligeables sur les comportements de l'enseignant et des élèves lors des enregistrements vidéos. Par peur de se faire juger par le chercheur, il peut y avoir hésitation de la part l'enseignant à opérationnaliser certains choix dans sa pratique d'enseignement ou hésitation de la part des élèves à prendre des risques intellectuels au moment de donner des réponses aux questions de l'enseignant, etc. D'ailleurs, nous avons observé qu'à certains moments du déroulement des séquences d'enseignement des deux enseignants, certains élèves ont systématiquement refusé de répondre aux questions de l'enseignant parce qu'ils étaient trop timides pour faire part de leur opinion en présence de la caméra.

2. La variabilité des modalités d'enregistrement vidéo selon les logiques d'enseignement des contenus disciplinaires retenues par les enseignants. Dans la classe de l'enseignante 1 où le milieu didactique (contexte d'apprentissage des modèles et de la modélisation) est essentiellement le même pour tous les élèves de la classe (les élèves sont impliqués dans des laboratoires communs lors du travail en équipe et reçoivent des enseignements identiques lors des plénières), nous avons fait le choix de fixer la caméra sur les interventions effectuées par l'enseignante et les élèves lorsque la modalité d'organisation de la classe en grand groupe (MOC-GG) s'appliquait et sur un groupe d'élèves en particulier ciblé par l'enseignante lorsque la modalité d'organisation de la classe en équipe (MOC-EQ) s'appliquait. Dans la classe de l'enseignant 2 où le milieu didactique diffère selon les groupes d'élèves de la classe (les élèves sont impliqués dans 8 laboratoires distincts et

---

<sup>85</sup> Nous pensons que l'effet de désirabilité est plus grand avec la présence du chercheur en raison de la reconnaissance par l'enseignant de l'expertise chercheur pour son regard sur sa pratique.

reçoivent à la fois des enseignements spécifiques à leurs laboratoires lors des multiples interventions de l'enseignant dans les équipes et reçoivent des enseignements identiques lors des plénières), nous avons également fait le choix de centrer la caméra sur les interventions effectuées par l'enseignant et les élèves lorsque la modalité d'organisation de la classe en grand groupe (MOC-GG) s'appliquait, mais nous avons suivi les interventions de l'enseignant dans chacun des groupes tout au cours du déroulement de la séquence d'enseignement lorsque la modalité d'organisation de la classe en équipes (MOC-EQ) s'appliquait. Ce choix méthodologique a été opéré en raison des séquences d'enseignement des deux enseignants qui apparaissaient très différentes à l'échelle mésoscopique dès le départ.

3. L'influence du technicien en audiovisuel se situant derrière la caméra relativement aux éléments pertinents qui sont filmés en classe, malgré le protocole d'enregistrement vidéo qui lui a été fourni. À titre d'exemple, lors d'une séance de l'enseignante 1, le technicien en audiovisuel n'a pas filmé une partie de la séance où les élèves étaient appelés à recueillir, dans la salle de laboratoire adjacente à la salle de classe, des données sur le mouvement d'un charriot sur un plan incliné<sup>86</sup>. Par conséquent, nous avons perdu un épisode important de cette séance où il y avait modélisation, ce qui a limité nos analyses pour cette partie de la séquence<sup>87</sup>.


4. Les limites de la technologie face aux sens humains dans l'interprétation du discours, des productions écrites et des gestes de l'enseignant et des élèves. Lors de la transcription des enregistrements vidéos, nous avons constaté plusieurs limites de la technologie audionumérique, parmi lesquelles l'impossibilité de comprendre et de transcrire le discours lorsque des interlocuteurs sont trop éloignés de la caméra, parlent à voix basse ou en même temps, ou encore lorsque les interactions discursives enregistrées dans une équipe de travail sont brouillées par le bruit de fond émis par la classe entière lors du travail en équipe. Sur le plan visuel, l'une des limites importantes a été l'impossibilité de reconnaître à plusieurs reprises le contenu présenté par un enseignant à l'aide du tableau blanc interactif (TBI) en raison de la réflexion de la lumière du TBI

---

<sup>86</sup> Il s'agit d'un événement imprévu qui résulte probablement d'un oubli de la part du technicien comme le protocole avait été bien expliqué par le chercheur au préalable.

<sup>87</sup> Pour remédier à ce problème, nous avons toutefois inféré les actions et tâches de l'enseignante et des élèves dans cet épisode.

dans la caméra (surbrillance de l'image). Pour réduire le plus possible les effets de certains de ces facteurs, nous avons sensibilisé les enseignants participants et le technicien en audiovisuel de l'influence possible de ces facteurs sur l'analyse des pratiques d'enseignement.

Une fois les enregistrements vidéos des deux séquences d'enseignement réalisées (pour l'ensemble des séances), les fichiers vidéos respectifs ont été intégrés dans le logiciel d'analyse vidéo *Transana*. Les transcriptions intégrales de ces enregistrements vidéos ont été réalisées par le chercheur principal (pour les 11 séances de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1) et par un étudiant de maîtrise du CREAS (pour les 14 séances de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2) au moyen de la fonction de transcription de *Transana*. Ce premier travail ne s'est pas réduit à une simple transcription des interactions langagières enseignant-élèves et élèves-élèves. Il a consisté en une préanalyse des enregistrements vidéos par : 1) l'identification de l'évolution des prises de parole par les acteurs de la classe (P pour enseignant et E pour élèves) au moyen des marqueurs temporels (boulettes temporelles  ) du logiciel ; 2) la mise en évidence des gestes importants que l'enseignant ou les élèves font au sein de ces interactions par une indication en caractère en italique ; 3) l'insertion de photogrammes (photos captées par le logiciel à des instants précis) pour situer les discours et gestes de l'enseignant et des élèves en lien avec les savoirs en jeu et qui pourront éventuellement être sélectionnés pour accompagner la présentation des résultats. La **figure 20** présente une photo et un extrait de l'enregistrement vidéo de la séance 1 de l'enseignante 1 dans laquelle elle aborde avec les élèves le signe de la variation de la vitesse d'un charriot dans le contexte d'une démonstration expérimentale.

P Alors j'ai mon petit mobile ici qui part de la position 0, se déplace dans ce sens-ci, puis augmente sa vitesse (*P déplace le charriot de la gauche vers la droite sur le référentiel en faisant augmenter sa vitesse*). Alors il y a une réelle augmentation de vitesse dans le bon sens de mon repère donc variation de position positive, variation de vitesse positive. Mon mobile avance toujours, mais je commence à le faire freiner. Sa vitesse ? (*P déplace le charriot de la gauche vers la droite sur le référentiel en faisant diminuer sa vitesse*) ✕



E Diminue ✕

P Diminue, mais est-ce qu'il continue à avancer ? Bien oui. La preuve, ces temps-ci c'est super glacé, une voiture qui veut éviter un piéton sur la route pèse sur les freins, est-ce qu'il continue à avancer ? ✕

E Oui

P Il continue à avancer. Ce n'est pas parce que l'on freine qu'on avance plus. Mais on avance ?

E Moins vite

P Moins vite ok ? Alors c'est possible qu'un mobile ait une variation de position positive tout en ayant une variation de vitesse négative. N'est-ce pas ? ✕

E Oui

Figure 20- Exemple de transcription d'un extrait d'un enregistrement vidéo dans la phase de préanalyse (Enseignante 1, séance 1)

### 2.3 Les artefacts utilisés dans les pratiques d'enseignement

Outre la planification de l'enseignement, nous avons demandé aux enseignants de nous fournir divers artefacts de classe utilisés dans le cadre de leur séquence d'enseignement de cinématique. Ces artefacts se réfèrent aux notes de cours, aux documents de laboratoire, etc. fournis par l'enseignant ainsi qu'aux productions écrites réalisées par les élèves comme les rapports de laboratoire, les évaluations, etc. Parmi ces artefacts, les documents de laboratoire ([annexes 8, 9 et 10](#)) et les rapports de laboratoire ont été ceux les plus utilisés à des fins d'analyse.



## 2.4 Le questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves de 5<sup>e</sup> secondaire en physique cinématique

Le questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves de 5<sup>e</sup> secondaire en physique cinématique ([annexe 11](#)) vise à obtenir des données pour répondre à la question spécifique de recherche 5 : *Quel potentiel les pratiques d'enseignement des enseignants offrent-elles pour la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique, plus particulièrement dans le domaine de la cinématique ?* En référence épistémologique à la modélisation, celui-ci a été élaboré de manière à sonder la compréhension conceptuelle des élèves dans le cadre de situations matérielles mettant en jeu divers modèles du mouvement, tout en décomposant les concepts en jeu, ce qui rejoint notre hypothèse formulée dans le cadre conceptuel quant à l'apprentissage par « petits éléments de savoir » en physique. Ce questionnaire comporte 27 questions à choix multiples visant à sonder la compréhension conceptuelle des élèves au terme des séquences d'enseignement sur divers concepts et modèles prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire : les concepts de référentiel, de position, de trajectoire, de distance parcourue, de déplacement, de vitesse (moyenne et instantanée), de variation de la vitesse, d'accélération (moyenne et instantanée), et les modèles du mouvement rectiligne uniforme (MRU), du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) et du mouvement balistique (MB) exprimés dans les registres de représentation algébrique, graphique et vectoriel. Néanmoins, le principal objectif de ce questionnaire étant de mesurer la compréhension qualitative du savoir chez les élèves, aucune question ne demande d'effectuer des opérations algébriques, graphiques ou vectorielles complexes. Son élaboration a été faite s'appuyant sur l'analyse conceptuelle du domaine de la cinématique que nous avons réalisée à partir de divers ouvrages scientifiques portant sur la physique mécanique (Alonso et Finn, 1986 ; Gibaud et Henry, 1999 ; Hecht, 2000 ; Kane et Sternheim, 1997 ; Mercier, 1945 ; Pérez, 1989 ; Serway et Boisvert, 1992), et de matériels didactiques pour l'enseignement de la physique en 5<sup>e</sup> secondaire (Bensaada et Ouellette, 2010 ; Champagne, Séguin et Cossette, 2017a, 2017b), laquelle a conduit à l'identification de facettes de savoir que nous jugeons fondamentales pour l'apprentissage de la cinématique ([annexe 2](#)). Par ailleurs, les tests standardisés développés par les didacticiens de physique David Hestenes et Ibrahim Halloun afin de mesurer la compréhension conceptuelle d'élèves du secondaire et d'étudiants universitaires dans les domaines de la

cinématique et de la dynamique ont largement contribué à la construction de notre questionnaire d'enquête. Il s'agit du *Force Concept Inventory* (FCI) (Henderson, 2002 ; Hestenes et Halloun, 1995; Hestenes *et al.*, 1992 ; Savinainen et Scott, 2002), du *Mechanics Baseline Test* (MBT) (Hestenes et Wells, 1992) et de l'*Inventaire des Conceptions de Base en mécanique* (« Inventories of Basic Conceptions in Mechanics »)<sup>88</sup> (Halloun, 2017). Ces trois tests n'étant pas disponibles en ligne, nous avons communiqué avec les Pr. David Hestenes et Ibrahim Halloun afin qu'ils nous fassent parvenir les versions originales de ceux-ci. À la demande de ces deux professeurs, ces tests ne sont pas inclus dans les annexes de cette thèse pour des raisons de confidentialité. Soulignons que la version finale du questionnaire a été construite une fois les séquences d'enseignement menées par les deux enseignants et qu'elle a fait l'objet d'une validation par ces derniers de manière à ce que les questions proposées couvrent dans la mesure du possible le champ des savoirs abordés par ces enseignants en classe. À l'**annexe 12**, nous présentons les contenus disciplinaires associés aux questions de questionnaire d'enquête des connaissances de base des élèves de 5<sup>e</sup> secondaire en physique cinématique.

### 3. LES PROCÉDURES D'ANALYSE DES DONNÉES

Les données récoltées dans le cadre de cette thèse sont essentiellement de trois ordres : 1) les données associées aux pratiques d'enseignement déclarées des enseignants relatives aux dimensions conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle et organisationnelle récoltées au moyen d'entrevues pré et postenregistrement réalisées avant et après les enregistrements vidéos (**annexes 5 et 6**) ; 2) les données associées aux pratiques d'enseignement observées des enseignants relatives à la dimension opérationnelle et qui sont récoltées au moyen d'enregistrements vidéos<sup>89</sup> des séquences d'enseignement en classe ; 3) les données associées à la compréhension conceptuelle des élèves sur les principaux concepts et modèles de cinématique prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire récoltées au moyen du questionnaire d'enquête au terme des séquences d'enseignement (**annexe 11**).

---

<sup>88</sup> La taxonomie de ce test est accessible à l'adresse Internet <http://www.halloun.net/wp-content/uploads/2016/10/IBC-Mechanics-Taxonomy-F06.pdf>.

<sup>89</sup> La documentation écrite qui accompagne la planification et la mise en œuvre des séquences d'enseignement (planification de l'enseignant, travaux d'élèves, etc.) est également utilisée comme source de données.

L'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en vue de caractériser et comparer leurs potentialités sur la compréhension des phénomènes de la physique en général, et sur l'acquisition des savoirs conceptuels de la cinématique en particulier, nécessite une triangulation des différentes sources de données : entrevues, enregistrements vidéos, planifications de l'enseignant, rapports de laboratoire, enquête sur les connaissances conceptuelles, etc. Cette triangulation se fait par des mises en relation et allers-retours continuels et systématiques entre les données issues de ces différentes sources. Si les techniques de traitement des données retenues pour analyser nos données n'ont pas été effectuées de manière linéaire, nous les présentons ici de cette façon afin de faciliter la compréhension du lecteur. Sur le plan technique, nous avons utilisé des logiciels de traitement des données qui se prêtent à chaque type de corpus : *Nvivo* pour traiter le corpus textuel associé aux pratiques d'enseignement déclarées des enseignants et *Transana* pour effectuer l'analyse des données vidéos.

### **3.1 Le traitement des données issues des entrevues pré et postenregistrement**

Les données issues des entrevues pré et postenregistrement consistent essentiellement en des éléments textuels qui proviennent des réponses des enseignants aux questions en lien avec les dimensions conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle de la pratique. Rappelons que les dimensions associées à chacune de ces questions sont bien identifiées dans les guides d'entrevue pré et postenregistrement présentés aux [annexes 5 et 6](#). Ces données, collectées au moyen d'un enregistreur audionumérique, ont été transcrites intégralement sous la forme de verbatims. La procédure d'analyse retenue est une analyse thématique de contenu (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996).

Si, dans une analyse de contenu, le chercheur peut s'intéresser à des contenus implicites ou explicites en fonction des choix théoriques retenus, c'est-à-dire au « dit » ou au « non-dit » du discours (Quivy et Campenhoudt, 2006 ; Van der Maren, 1996), notre analyse de contenu s'inscrit dans la première logique : elle consiste en une analyse du discours explicite qui considère les énoncés d'un discours « comme une manifestation portant des indices que l'analyse va faire parler » (Bardin, 2007, p. 130). Dans cette perspective, l'analyse de contenu vise à « condenser,

résumer ou éclairer, systématiser le contenu de la pensée d'un ou plusieurs énonciateurs » (Van der Maren, 1996, p. 418).

Ainsi, une analyse de contenu par catégorisation thématique a été opérée pour chacune des questions spécifiques de recherche 1, 2 et 4 respectivement en lien avec les dimensions conceptuelle (*quelles significations les enseignants attribuent-ils aux modèles et à la démarche de modélisation ?*), fonctionnelle (*quelles sont les intentions éducatives poursuivies par les enseignants dans l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?*) et organisationnelle (*quels sont les défis, les difficultés, ainsi que les facteurs facilitant ou entravant l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?*) de la pratique.

Nous avons appliqué cette méthode d'analyse en suivant les trois phases chronologiques proposées par Bardin (2007, p. 125) : « 1) la préanalyse ; 2) l'exploitation du matériel ; 3) le traitement des résultats, l'inférence et l'interprétation ». La phase de préanalyse a pour objectif la systématisation du cadre conceptuel et d'analyse de départ pour arriver à un plan d'analyse précis. Pour ce faire, nous avons effectué une « lecture flottante » du corpus (Bardin, 2007) qui consiste à se familiariser avec les données de celui-ci, et ce, afin de construire une grille d'analyse thématique préliminaire dont les catégories peuvent être déduites du cadre conceptuel et d'analyse ou émerger des analyses effectuées. Ainsi, la construction des catégories préliminaires a été réalisée en recourant à une grille d'analyse thématique mixte « où une partie des catégories analytiques dérive d'une théorie alors qu'une autre partie émerge du matériel analysé »<sup>90</sup> (Landry, 1994, p. 336).

À l'étape suivante, celle de la catégorisation, qui permet de passer des données brutes aux données organisées, il s'agissait de classer, pour chacune de nos questions spécifiques de recherche, des éléments « constitutifs d'un ensemble par différenciation puis regroupement par genre (analogie) d'après des critères préalablement définis » (Bardin, 2007, p. 150). Une fois la catégorisation stabilisée, nous avons procédé à l'exploitation du matériel, ou pour le dire en d'autres mots, au codage proprement dit (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996). Le

---

<sup>90</sup> La construction de nos catégories d'analyse a été fortement inspirée des éléments présentés dans la problématique et le cadre conceptuel.

codage est pour plusieurs auteurs « le processus par lequel les données brutes sont transformées systématiquement et agrégées dans des unités qui permettent une description précise des caractéristiques pertinentes du contenu » (Holsti, 1969, dans Bardin, 2007, p. 134).

L'organisation du codage implique le choix du découpage du texte en unités d'analyse ou d'enregistrement. Au regard de nos objectifs spécifiques de recherche, nous avons retenu le découpage en unités d'analyse en cherchant à repérer lors de notre analyse thématique « des “noyaux de sens” qui composent la communication et dont la présence ou la fréquence d'apparition pourront signifier quelque chose pour l'objectif analytique choisi » (Bardin, 2007, p. 137). Plus précisément, il s'agissait de découper le discours explicite en des unités de sens et de placer ces unités dans des catégories appropriées. À la suite de Bardin (2007), nous considérons une unité de sens comme étant le plus court segment qui fait sens par rapport à l'objet étudié. Si l'unité de sens peut être de longueur variable (un mot, une phrase ou un paragraphe), elle renvoie dans tous les cas à la signification attribuée à la catégorie considérée. C'est à l'étape du codage que nous avons stabilisé les catégories thématiques de la grille d'analyse préliminaire. Le logiciel *NVivo* a été d'une aide précieuse autant pour la phase de préanalyse que pour celle du codage des données. Celui-ci nous a permis de construire de manière dynamique des catégories pertinentes pour rendre compte de notre corpus, d'une part, et de quantifier les catégories construites au fur et à mesure de l'état d'avancement de nos analyses, d'autre part. La quantification des catégories consiste à mettre en évidence le nombre de fois que les unités de sens apparaissent dans le discours explicite des enseignants en fonction du système catégoriel retenu. Au moment de la réalisation des entrevues, nous avons constaté que les réponses données par les enseignants ne se rattachaient pas toujours exclusivement à la dimension de la pratique d'enseignement explorée. Cela nous a conduit à appliquer la grille d'analyse thématique sur l'ensemble du corpus, et ce, pour chacune des questions spécifiques de recherche 1, 2 et 4, de manière à ne pas oublier des éléments du discours qui pourraient être associés à plus d'une dimension de la pratique.

Enfin, pour le traitement, l'inférence et l'interprétation des résultats, nous avons organisé les données de manière à mettre en évidence le ou les systèmes catégoriels construits pour chacune des questions spécifiques de recherche. Concrètement, nous avons produit des tableaux qui présentent les principales catégories, leur fréquence respective et des exemples d'extraits illustratifs

de ces catégories. Par ailleurs, dans chacun des exemples d'extraits illustratifs, nous avons souligné les éléments significatifs qui collent le plus près possible à la catégorie retenue. La sélection des unités de sens pour la présentation des résultats a été faite de manière à mettre en évidence la diversité des idées exprimées par les enseignants en faisant l'inventaire complet des idées jusqu'à leur saturation. Par ailleurs, nous nous sommes limités essentiellement aux parties des unités qui font minimalement sens aux catégories et sous-catégories retenues dans la grille d'analyse. Ainsi, dans la plupart des cas, les unités de sens retenues pour illustrer les résultats correspondent à une version réduite de celles codées avec le logiciel *NVivo* afin de ne conserver que le verbatim significatif.

De manière à construire des catégories permettant de rendre compte le plus fidèlement possible de notre corpus en lien avec les questions spécifiques de recherche, nous nous sommes assurés de respecter quatre critères dans le codage des données : la pertinence, l'exhaustivité, l'exclusivité, l'objectivité et la fidélité. Ces critères se rapportent à certaines exigences fondamentales rapportées dans les travaux de Bardin (2007), de Freyssinet-Dominjon (1997), de Jones (2000), de Landry (1994) et de Robert et Bouillaguet (1997). La pertinence invoque l'adéquation entre le matériel d'analyse choisi et le cadre conceptuel et d'analyse retenu, ce qui revient à dire qu'une catégorie est pertinente lorsqu'elle rejoint certaines intentions ou questions spécifiques de recherche. L'exhaustivité invoque la qualité de la grille quant à sa capacité de prendre en compte un nombre minimal de données du corpus en vue de produire des résultats sur chacune des catégories. L'exclusivité invoque l'idée que les catégories construites sont mutuellement exclusives, c'est-à-dire qu'au moment du codage des unités de sens dans les catégories appropriées, celles-ci ne peuvent être associées à plusieurs catégories à la fois. Au cours du processus de catégorisation, nous avons pris soin de bien définir les catégories en mettant en évidence leurs attributs caractéristiques à l'aide d'exemples d'extraits. Enfin, pour ce qui est des derniers critères, ceux d'objectivité et de fidélité, ils se rapportent à la clarté de la définition des catégories. Ces critères impliquent qu'une même grille catégorielle appliquée sur un même matériel par un même codeur ou plus d'un codeur devrait produire sensiblement les mêmes résultats. Dans le cas de notre étude, et pour des raisons de temps, la vérification de ces critères s'est faite au moyen d'une validation intrajuge. Il s'agit de procéder à un test de fiabilité une fois que tout le matériel est analysé. Comme le souligne Landry (1994, p. 353), le test de fiabilité permet de

s'assurer « que les mêmes règles de codification engendrent les mêmes données à partir des mêmes textes ». Pour ce faire, nous avons codé les unités de sens à deux moments différents, dans un intervalle de 6 mois afin d'éliminer le plus possible les incohérences dites d'« intracodeurs » (Landry, 1994) et de stabiliser les catégories produites. Les résultats du test de stabilité ont montré que plus de 90 % des unités de sens ont été affectés dans les mêmes catégories entre ces deux moments.

### **3.2 Le traitement des données issues des enregistrements vidéos des séquences d'enseignement**

Les données issues des enregistrements vidéos des séquences d'enseignement sont les principales données retenues pour l'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle de la dimension opérationnelle, car elles permettent de fournir des éléments de réponses aux questions spécifiques de recherche 3 et 5 : *comment s'opérationnalise l'enseignement-apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation dans les pratiques d'enseignement des enseignants aux échelles du temps didactique macroscopique, mésoscopique et microscopique ? Quel potentiel ces pratiques offrent-elles pour la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique, en particulier en cinématique ?* Comme nous l'avons souligné précédemment, la pratique d'enseignement des modèles et de la modélisation des enseignants est une construction du chercheur sur la base de la pratique déclarée et de la pratique observée, et par conséquent, son analyse nécessite de prendre également en compte la pratique déclarée de l'enseignant lors des entrevues pré et postenregistrement (**figure 19**).

Notre analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en vue de répondre aux questions spécifiques de recherche 3 et 5 a été réalisée à trois échelles du temps didactique (Mercier *et al.*, 2002) : macroscopique, mésoscopique microscopique. Dans les sous-sections suivantes, nous décrivons de manière détaillée les procédures d'analyse que nous avons effectuées à chacune de ces échelles du temps didactique.

### 3.2.1 L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique

L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle macroscopique qui est de l'ordre de la séquence d'enseignement permet de se donner une vision globale des savoirs disciplinaires en jeu dans les séquences d'enseignement, pour l'ensemble des séances. Cette analyse conceptuelle permet de dégager la structure du savoir à un niveau de granularité relativement élevé (Malkoun, 2007 ; Seck, 2007). Elle consiste à mettre en évidence les groupes de savoirs du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui sont mobilisés dans les séquences d'enseignement en donnant des indications sur le nombre total de facettes de savoir et la fréquence d'apparition totale des facettes pour chacun de ces groupes. Plus précisément, elle consiste à situer les laboratoires mis en œuvre au sein des séquences et les groupes de savoirs mobilisés au sein de ces laboratoires.

Les résultats de cette analyse sont présentés sous la forme d'un réseau conceptuel (voir par exemple la **figure 24** qui présente le réseau des savoirs en relation avec les laboratoires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1). La construction de ce réseau implique une analyse conjointe du savoir à enseigner et du savoir enseigné (le savoir enseigné déclaré par l'enseignant et le savoir enseigné observé par le chercheur). Pour ce faire, nous avons effectué une analyse de contenu au moyen d'une grille thématique mixte (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996)<sup>91</sup> en triangulant les données textuelles issues du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire relatives aux savoirs à enseigner (les savoirs du programme officiel), les données textuelles issues des entrevues préenregistrement relatives aux savoirs enseignés déclarés (les savoirs des pratiques d'enseignement déclarées) et les données textuelles issues des enregistrements vidéos relatives aux savoirs enseignés observés (les savoirs effectivement enseignés et observés par le chercheur). Plus précisément, les savoirs enseignés déclarés ont été identifiés par une analyse des données issues des questions posées dans les deux premières parties des entrevues préenregistrement, celles qui se réfèrent aux composantes du *quoi enseigner* et du *comment enseigner ce qui sera enseigné* (voir les questions 1.1, 1.2, 1.3, 2.1 et 2.2 à l'**annexe 5**). Dans la partie 1 du guide d'entrevue préenregistrement, ces questions se réfèrent aux contenus ou savoirs disciplinaires (concepts,

---

<sup>91</sup> En fait, nous avons recouru à la même méthode d'analyse que nous avons décrite précédemment pour analyser les données textuelles relativement aux dimensions conceptuelle, fonctionnelle et opérationnelle de la pratique.



modèles, etc.) du programme que les enseignants souhaitent que les élèves apprennent et retiennent au cours de leur séquence d'enseignement. Dans l'identification des savoirs enseignés déclarés, nous nous intéressons également aux contenus disciplinaires qui ont fait l'objet d'enseignement dans des cours antérieurs et que les enseignants souhaitent que les élèves mobilisent dans leur séquence d'enseignement. Dans la partie 2 du guide d'entretien préenregistrement, ces questions se réfèrent aux déroulements général et spécifique de leur séquence d'enseignement ; le déroulement spécifique étant celui dans lequel l'enseignant prétend recourir à une démarche visant de manière spécifique l'acquisition de modèles. Notre préanalyse du corpus a montré que la description de ces déroulements par les enseignants permet de mettre en évidence une large gamme de savoirs que les élèves peuvent mobiliser ou construire au cours d'une séquence d'enseignement, et qui souvent ne sont pas invoqués, ou du moins le sont partiellement dans la première partie de l'entretien. Quant aux savoirs effectivement enseignés, nous les avons dégagés progressivement au cours des analyses des enregistrements vidéos effectuées à l'échelle microscopique. Ces savoirs peuvent s'exprimer en facettes de savoir construites ou mobilisées à travers les discours et gestes au sein des interactions enseignant-élèves et élèves-élèves tout au long des séquences d'enseignement.

Comme nous l'avons souligné précédemment, notre étude s'inscrit dans la même perspective que les travaux menés par Tiberghien et ses collègues (Tiberghien, Malkoun et Seck, 2008 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) et vise à comparer « la pratique de classes de même niveau et dont l'enseignement porte sur les mêmes contenus. Cette différenciation suppose de caractériser les potentialités respectives des classes qui permettent de favoriser l'apprentissage d'une majorité d'élèves. La perspective est de mettre en relation les caractéristiques avec les acquisitions des élèves du point de vue du savoir (au sens large incluant les savoir-faire et l'épistémologie) » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 77). Cette intention nous conduit à caractériser et comparer la singularité des pratiques des deux enseignants de notre échantillon de manière à dégager leur potentialité sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique (chute libre, mouvements d'objets matériels sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.). Pour ce faire, les analyses de pratiques d'enseignement sont réalisées aux échelles du temps didactique mésoscopique et microscopique.

### 3.2.2 L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique

L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle mésoscopique, qui est de l'ordre de la dizaine de minutes ou de l'heure, permet de se donner une idée de la manière dont les savoirs disciplinaires structurent chacune des séances au moyen d'indicateurs d'ordre mésoscopique (Roth *et al.*, 2006 ; Seck, 2007 ; Seidel, Prenzel et Kobarg, 2005 ; Sensevy et Mercier, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2008). Elle correspond à ce que Seck (2007, p. 92) appelle « les formes de mise en scène dans une classe pouvant caractériser la classe en termes de la chronogenèse (progression du savoir), de topogenèse (position des acteurs par rapport à cette progression) et de contrat ». Ces analyses débouchent sur la construction de synopsis (Schubauer-Leoni *et al.*, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) ou ce que Buty *et al.* (2012) appellent des « tableaux synoptiques ». Le synopsis correspond « à la première analyse que fait le chercheur quand il travaille avec les données correspondant à une séance. Dans la construction d'un synopsis, le chercheur se situe en observateur extérieur en prenant le point de vue global de la classe et se situe ainsi plus proche de l'enseignant que de chaque élève (Tiberghien *et al.*, 2007a). L'usage du synopsis vise à réduire la quantité importante d'information (discours, actions, gestes, etc.) d'une séance, d'une part, et à repérer les événements qui se prêtent à une analyse plus fine selon le cadre d'analyse du chercheur (les analyses effectuées à l'échelle microscopique), d'autre part.

Dans cette étude, l'analyse à l'échelle mésoscopique vise la construction de synopsis des séances structurés autour de cinq variables mésoscopiques : les thèmes et sous-thèmes disciplinaires abordés dans les séances, leurs contextes de traitement, les phases de la démarche de modélisation en référence avec celles de la démarche retenue dans le cadre conceptuel (**figure 8**), les ressources didactiques, ainsi que les modalités d'organisation de la classe.

La construction des synopsis a été réalisée à l'aide du logiciel d'analyse *Transana*. Soulignons que les fonctions de ce logiciel offrent plusieurs possibilités d'analyse. Outre les indications fournies pour la fréquence d'apparition et la durée des événements associés à chacune des catégories d'analyse, le logiciel permet de faire des croisements entre les variables retenues de manière à obtenir de nouvelles variables. Il est possible de combiner des variables en recourant à des opérateurs booléens comme l'intersection (ET logique), la réunion (Ou logique) et la négation.

Par exemple, en combinant la variable « modalités d'organisation de la classe » avec la variable « contextes de traitement des thèmes disciplinaires » au moyen de l'opérateur booléen intersection (ET logique), nous obtenons la nouvelle variable « modalités d'organisation de la classe selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires » qui peut prendre différentes modalités, par exemple : « théorie en grand groupe », « réalisation d'un laboratoire en équipes » ou « correction d'exercices en individuel ». Dans la présentation des résultats, nous exposons non seulement des indications quant à la fréquence d'apparition et la durée des 5 variables mésoscopiques retenues (thèmes disciplinaires abordés dans la séance, contextes de traitement des thèmes, phases de la démarche de modélisation, ressources didactiques utilisées et modalités d'organisation de la classe), mais aussi des indications pertinentes concernant de nouvelles variables générées en croisant nos 5 variables mésoscopiques de base. Dans les sous-sections suivantes, nous décrivons les procédures d'analyse pour chacun des indicateurs mésoscopiques retenus.

### 3.2.2.1 *Les thèmes et sous-thèmes disciplinaires*

L'unité principale de découpage temporel pour analyser les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle mésoscopique est celle du thème. Pour Tiberghien et Malkoun (2007), l'intérêt à recourir à une analyse thématique réside dans le fait qu'elle permet de mettre en évidence la progression chronologique des éléments de savoirs (la chronogénèse), les acteurs de la classe qui les prennent en charge, leur contexte d'émergence, ainsi que la responsabilité de ces acteurs dans leur construction (la topogénèse).

Le thème joue deux rôles : décomposer le discours de la classe en unités dans un ordre chronologique et investiguer comment les éléments de savoir sont introduits, par quels acteurs, et avec quels supports (expérimentation, texte, etc.). Cette unité est particulièrement pertinente pour investiguer la responsabilité des élèves et de l'enseignant dans le développement et le déploiement de ces éléments de savoir (topogénèse)<sup>92</sup> (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 7).

Les thèmes sont des unités de découpage des productions discursives de l'ordre de la dizaine de minutes (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a). Ils sont centrés sur les objets

---

<sup>92</sup> Traduction libre : « The theme plays two roles: decomposing the classroom discourse into units in a chronological order and investigating how element of knowledge are introduced, by which actors, with what supports (experiment, text, etc.). This unit is particularly relevant to investigate the students' and teacher's responsibility for knowledge development and display (topogenesis) » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 7)

de savoir en jeu dans la classe. Ils sont eux-mêmes décomposables en d'autres unités plus petites, les sous-thèmes, qui correspondent à des aspects plus spécifiques des thèmes. Ces sous-unités du thème recouvrent néanmoins le thème du fait que leur juxtaposition permet de reconstituer le thème dans sa globalité. Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, le thème 1 est « variables du mouvement » et ce thème recouvre les sous-thèmes « vitesse », « variation de la vitesse », « accélération », etc.

Le repérage des thèmes et sous-thèmes a été fait au moyen d'un indicateur-clé (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) : la cohérence thématique autour d'un même objet de savoir. Identifier les moments de travail sur des thèmes revient à identifier les moments qui « ont une structure, avec des frontières et une cohérence thématique. La plupart du temps, elles incluent une introduction et une conclusion, la majorité des énoncés est reliée au même thème » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 107). Comme la cohérence thématique dépend de la structure du savoir en jeu, le thème comme unité temporelle est conséquemment de durée variable : « de quelques minutes à plus d'une demi-heure. Sa délimitation dépend de la connaissance et de la communication »<sup>93</sup> (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 7).

Les frontières qui délimitent le discours de classe sont fréquemment explicites et peuvent être repérées par des marqueurs langagiers (un mot comme : bien, maintenant, etc. ou une expression comme : maintenant on va passer à..., ce qui fait opposition à... est le concept de..., etc.), par des gestes (l'enseignant efface le tableau, change de position, etc.). Au début de la séance 2, après avoir effectué la correction d'exercices en grand groupe sur des problèmes portant sur la distance parcourue, le déplacement, la vitesse, l'enseignante 1 introduit des notes théoriques sur la notion d'accélération. Pour cette transition, l'enseignante 1 utilise l'expression « Bien là on s'en va parler... » comme marqueur de relation entre les deux thèmes.

Bien là on s'en va parler d'accélération. Tout le dernier cours, à la fin du dernier cours, j'ai introduit cette notion-là, sans la nommer là, puis sans faire de formules mathématiques avec vous, mais on en a déjà parlé. Ce que l'on appelle accélération, c'est lorsqu'il y a un changement dans la vitesse, tout simplement. (Ens 1, séance 2)

---

<sup>93</sup> Traduction libre : « from a few minutes to more than half an hour. Its delimitation depends on knowledge and communication » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 7)

De même, à la séance 5, lors de la prise de note de cours en grand groupe, l'enseignante 1 passe du thème 3 (MRU) au thème 4 (MRUA) au moment où elle souligne : « Alors si le mouvement n'est pas rectiligne et uniforme, qu'est-ce qu'il va être ? » (Ens 1, séance 5). C'est à partir de ce moment que nous considérons l'introduction de ce nouveau thème qui est en rupture avec le thème précédent, et non au moment où elle le souligne explicitement peu de temps après : « Ce qui fait qu'en opposition au mouvement rectiligne uniforme, on va parler de mouvement rectiligne uniformément accéléré » (Ens 1, séance 5).

Contrairement aux analyses thématiques menées par Tiberghien et ses collègues (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a) qui sont effectuées exclusivement sur la base des observations directes du chercheur à partir des enregistrements vidéos, notre technique d'analyse pour le découpage thématique prend en compte le point de vue des enseignants (Hasni *et al.*, 2015 ; Hasni, Bousadra et Roy, 2012). Cette prise en compte du point de vue de l'enseignant dans le découpage thématique se justifie « par l'idée qu'en se collant à la description que l'enseignant donne de ses intentions au regard du déroulement prévu de la séance et de son retour sur ce même déroulement après le cours, on a plus de chance de réduire la distorsion entre les intentions de l'enseignant et l'interprétation du chercheur » (Bousadra, 2014, p. 139). Dans le cas de notre étude, ce choix se justifie d'autant plus que les entrevues préenregistrement et postenregistrement ont été réalisées dans une période de temps relativement près des enregistrements vidéos réalisés en classe ce qui favorise la rétention des informations dans la mémoire de l'enseignant.

Par conséquent, la cohérence thématique est déterminée par une triangulation des données issues de cinq sources : 1) les données issues des entrevues préenregistrement et postenregistrement dans lesquelles les enseignants sont appelés à expliciter les savoirs enseignés déclarés ; 2) les données issues de la planification des enseignants ; 3) les données issues du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire qui précise les savoirs à enseigner par les thèmes prescrits (notamment ceux de cinématique) ; 4) les données issues des matériels didactiques utilisés par les enseignants et qui proposent une progression des thèmes à aborder avec les élèves ; 5) les données issues des enregistrements vidéos qui donnent accès aux savoirs effectivement enseignés et observés par le chercheur.

Trois règles ont guidé la description des thèmes et sous-thèmes. La première est que leur reconstitution faite par le chercheur doit rester « au plus près du contenu du savoir en jeu dans la classe » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 100). Autrement dit, les étiquettes choisies pour leur description doivent être cohérentes avec les objets de savoir réellement abordés par les enseignants. La seconde est que les étiquettes choisies doivent se rapprocher le plus possible du langage utilisé par les enseignants pour les décrire au moment des entrevues préenregistrement menées par le chercheur et lors de la mise en œuvre effective des séquences d'enseignement avec les élèves. C'est donc dans la même perspective que Tiberghien et Malkoun (2010, p. 7) que nous concevons la construction thématique d'une séquence d'enseignement : « Le titre d'un thème représente le contenu du thème ; sa formulation devrait être aussi proche que possible du discours effectif de la classe. Les mots utilisés dans le titre devraient être effectivement impliqués dans le discours de la classe. »<sup>94</sup> La troisième règle qui a guidé notre analyse thématique consiste à attribuer dans la mesure du possible des étiquettes communes aux thèmes et sous-thèmes des deux séquences d'enseignement, et ce, afin d'être en mesure de comparer les pratiques d'enseignement des deux enseignants sur la base d'une référence se voulant la plus commune possible.

Le découpage thématique en thèmes et sous-thèmes n'est pas une opération simple. Le respect des trois règles susmentionnées a une conséquence importante sur le choix des étiquettes retenues pour décrire ce qui se passe effectivement en classe. Les sous-thèmes ne correspondent pas toujours à un concept unique du programme d'étude officiel. Il peut en faire appel à plus d'un. En outre, lors du découpage thématique, nous pouvons retrouver dans un thème des productions discursives qui ne sont pas complètement reliées au thème, ce que Tiberghien et Buty (2007) appellent des « inclusions ». C'est le cas par exemple lorsque l'enseignant fait un lien avec des savoirs enseignés antérieurement qui ne sont pas en cohérence avec le thème abordé. Dans les deux séquences d'enseignement analysées, nous avons constaté que ces inclusions sont peu fréquentes et qu'elles se déroulent sur des intervalles de temps très courts, soit entre 30 secondes et deux minutes. Sur le plan méthodologique, nous ne les avons donc pas considérées, car leur prise en compte aurait nécessité une « surcharge » du découpage thématique. Sur le plan opérationnel, une

---

<sup>94</sup> Traduction libre : « The title of a theme represents the theme content ; its formulation should be as close as possible of the effective discourse. The words used in the title should be effectively involved in the classroom discourse. ». (Tiberghien et Malkoun, 2010, p. 7)

« lecture flottante » (Bardin, 2007) des transcriptions des séances a permis dans un premier temps d'identifier les thèmes et sous-thèmes en jeu et de les annoter dans la fenêtre de transcription du logiciel *Transana*, et dans un second temps de les coder avec ce logiciel. Le découpage thématique en thèmes et sous-thèmes a été appliqué sur l'ensemble des séances des deux séquences d'enseignement. Dans les résultats, nous produisons des tableaux mettant en évidence les thèmes et sous-thèmes disciplinaires avec leur durée et leur fréquence relative par rapport à la durée totale des séquences d'enseignement.

### 3.2.2.2 *Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires*

Lors de la mise en œuvre des séquences d'enseignement, les thèmes disciplinaires peuvent être ancrés dans divers contextes. Dans leurs analyses des pratiques d'enseignement de la physique, Tiberghien *et al.* (2007a) recourent aux « phases didactiques » afin de circonscrire les tâches que font l'enseignant et les élèves dans des actions types de l'activité d'enseignement. Ces actions types consistent en des catégories préétablies issues de la théorie de l'action conjointe (Sensevy, 2007). Ces auteurs ont identifié six « phases didactiques » dans l'enseignement : 1) *L'introduction* d'une séance, d'une activité, d'un exercice ou d'une expérience où l'enseignant présente le plan de la séance, les consignes, l'organisation du travail et précise les tâches à faire, le matériel, les lectures, les ressources, etc. dont les tâches sont effectuées essentiellement par l'enseignant ; 2) *Le développement* où l'enseignant explique le cours, définit des notions, etc., et dont les tâches sont effectuées par l'enseignant seul ou de manière conjointe par l'enseignant et les élèves ; 3) *L'évaluation orale des connaissances* où l'enseignant procède explicitement à une évaluation orale des élèves ; 4) *La réalisation* d'une activité ou d'exercices par les élèves seuls ou de manière conjointe par l'enseignant et les élèves ; 5) *La correction* d'une activité ou d'exercices par les élèves seuls ou de manière conjointe par l'enseignant et les élèves ; 6) *La clôture de la séance* qui consiste à résumer ce qui a été fait durant la séance, à donner des consignes sur ce qui doit être fait à la maison, à introduire les contenus qui vont être abordés à la séance suivante, etc.

Dans notre étude, nous nous inspirons des actions types de l'activité d'enseignement proposées par Tiberghien *et al.* (2007a) afin de circonscrire ces activités dans l'une des composantes du milieu didactique que nous appelons le « contexte de traitement des thèmes disciplinaires ». Contrairement aux actions types proposées par ces auteurs, le contexte de

traitement des thèmes disciplinaires n'est pas centré sur des actions de l'enseignant ou des élèves, mais plutôt sur des éléments d'ordre contextuel. Il témoigne du milieu dans lequel évolue la construction du savoir en considérant que l'un des principaux enjeux de l'enseignement de physique consiste à accorder une place importante aux laboratoires afin que les élèves soient en mesure de recueillir des faits nécessaires à la modélisation et la compréhension des phénomènes du monde matériel. Les laboratoires sont pour nous des activités typiques de l'enseignement des sciences (et plus particulièrement de la physique) à côté d'autres activités comme la théorie et les exercices. Notre analyse des pratiques d'enseignement de ces deux enseignants a conduit à la conceptualisation de quatre contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans lesquels les thèmes peuvent être ancrés : la gestion du travail, la théorie, les exercices (réalisation ou correction) et les laboratoires (explications, réalisation, correction) ([annexe 13](#)).

Dans les résultats, comme c'est le cas de la variable thèmes et sous-thèmes disciplinaires, nous produisons des tableaux qui mettent en évidence les contextes de traitement des thèmes disciplinaires avec leur durée et leur fréquence relative par rapport à la durée totale des séquences d'enseignement.

### *3.2.2.3 Les phases de la démarche de modélisation*

L'analyse des pratiques d'enseignement du point de vue de cet indicateur mésoscopique vise à rendre compte des moments forts où il y a mise en œuvre d'une démarche de modélisation au cours de la séquence d'enseignement. Le repérage de ces moments s'effectue par la triangulation des données issues des entrevues préenregistrement et des données issues de l'observation des enregistrements vidéos. Il s'agit de prendre en compte ce que l'enseignant déclare à la question 2.2 du guide d'entrevue préenregistrement ([annexe 5](#)) et de s'appuyer sur les indicateurs qui découlent de notre cadre d'analyse en lien avec ce que nous entendons par une activité de modélisation, d'une part, et par une démarche de modélisation, d'autre part. Les activités de modélisation correspondent aux activités dans lesquelles l'enseignant ou les élèves sont appelés à utiliser, évaluer, réviser ou construire ou reconstruire des modèles (Clement, 1989 ; Gilbert, 2004 ; Halloun, 2007 ; Hestenes, 1987, 1992 ; Justi et Gilbert, 2002a, 2002b, 2003 ; Van Joolingen, 2004 ; Wells *et al.*, 1995 ; White, 1993). Pour ce qui est de la démarche de modélisation et de ses phases, nous nous référons aux indicateurs de la démarche de modélisation en quatre phases que nous avons développée dans le cadre conceptuel ([figure 8](#)). Bien qu'une démarche de modélisation contienne nécessairement des



activités de modélisation, ces dernières peuvent parfois se situer en marge d'une telle démarche si elles ne sont pas problématisées et ne font pas l'objet d'une synthèse. À l'aide du logiciel *Transana*, nous avons codé par la variable *démarche de modélisation* (DEM-MOD) tous les intervalles de temps où il y avait présence d'une démarche de modélisation, peu importe les phases ou le nombre de phases mobilisées, et nous avons codé chacune des phases de cette démarche par les variables *problématiser* (PRO), *planifier* (PLA), *investiguer* (INV), *conceptualiser et déployer* (CONC-DEP) ou *autres phases* (AUT). Au niveau mésoscopique, cette analyse est importante, car elle permet de voir quelle proportion du temps de la séquence les enseignants accordent à cette démarche par rapport aux autres activités de classe. Cette analyse est reprise à l'échelle microscopique dans des analyses visant à décrire les modalités d'introduction (mobilisation ou construction) des facettes de savoir en regard d'une démarche de modélisation : les facettes de savoir sont-elles introduites en marge de la démarche ou au sein de celle-ci, et dans ce dernier cas, dans quelles phases ?

Dans les résultats, nous produisons des tableaux qui mettent en évidence les phases de la démarche de modélisation dans les divers laboratoires mis en œuvre dans les séquences d'enseignement, et ce, en indiquant les épisodes couverts dans les synopsis, leur durée et leur fréquence relative par rapport à la durée totale des séquences.

#### 3.2.2.4 Les ressources didactiques utilisées

L'analyse des pratiques d'enseignement du point de vue de cet indicateur mésoscopique vise à rendre des ressources didactiques utilisées par l'enseignant et les élèves lors de la mise en œuvre des séquences d'enseignement, et ce, à travers les différents contextes de traitement des thèmes et sous-thèmes disciplinaires. Il existe une grande diversité de ressources didactiques pouvant être exploitées par l'enseignant et les élèves dans le contexte d'un enseignement disciplinaire, et que les ressources didactiques retenues, ainsi que le système catégoriel utilisé par le chercheur pour les catégoriser dépendent des intentions et objectifs de la recherche. Le repérage des ressources didactiques utilisées par l'enseignant et les élèves lors de la mise en œuvre des séquences d'enseignement s'est fait en se centrant uniquement sur les ressources didactiques qui véhiculent des contenus disciplinaires. Ainsi, nous avons exclu les ressources didactiques qui ne véhiculent pas de savoirs disciplinaires comme le rétroprojecteur à transparent, le projecteur multimédia

(appelé aussi canon), ainsi que le tableau (tableau vert conventionnel ou tableau blanc interactif). Nous considérons ces ressources davantage comme des moyens ou des supports matériels qui permettent de mettre en évidence les contenus disciplinaires de certaines ressources didactiques. À ce sujet, si l'enseignant utilise le tableau blanc interactif pour projeter les contenus théoriques du manuel scolaire ou pour exposer des notes de cours au moment d'une plénière, nous ne considérons que le manuel scolaire et les notes de cours comme ressources didactiques. De même, si une équipe d'élèves présente, à l'aide du projecteur multimédia, les résultats de leur laboratoire en s'appuyant sur les données de leur rapport de laboratoire et sur du matériel de laboratoire (ex. : une table à coussin d'air et une rondelle), nous ne considérons que le rapport de laboratoire et le matériel de laboratoire comme ressources didactiques. Par ailleurs, comme les synopsis des séances visent à rendre compte de la pratique d'enseignement dans sa phase interactive, nous ne considérons que les ressources didactiques utilisées au moment de l'enseignement-apprentissage. En conséquence, les ressources didactiques utilisées par l'enseignant de la phase préactive pour la planification de son enseignement ne sont pas considérées et n'apparaissent donc pas dans les synopsis des séances. Le repérage des ressources didactiques s'effectue par la triangulation des données issues des entrevues préenregistrement et des données issues de l'observation des enregistrements vidéos. Il s'agit notamment de prendre en compte ce que l'enseignant déclare aux questions 3.1, 3.2 et 3.3 de la partie 3 du guide d'entrevue préenregistrement ([annexe 5](#)). Ces questions portent sur le matériel didactique produit par les éditeurs de manuels scolaires et sur les autres ressources. Nos analyses ont permis d'identifier neuf catégories de ressources didactiques utilisées par les enseignants et les élèves dans les deux séquences d'enseignement analysées ([annexe 14](#)).

Le codage des ressources didactiques a été réalisé par l'observation directe des enregistrements vidéos au moyen de la fonction de codage du logiciel *Transana*. Toutes les minutes des séquences ont été codées selon la nature des ressources didactiques et selon la modalité de leur utilisation par l'enseignant et les élèves. Selon les moments de la séquence, les ressources didactiques peuvent faire l'objet d'une utilisation exclusive par l'enseignant (P) ou les élèves (E) ou d'une utilisation conjointe par ces deux acteurs (P et E). À la suite d'Hasni *et al.* (2015), nous considérons les repères suivants pour caractériser les unités de codage des ressources didactiques en fonction du temps : le début du codage correspondant au moment où l'enseignant donne la

consigne explicite visant l'utilisation de la ou des ressources pour la réalisation d'une tâche et la fin du codage correspondant à la fin de la tâche pour laquelle la ou les ressources ont été invoquées.

Dans les résultats, nous produisons des tableaux qui mettent en évidence les ressources didactiques utilisées par l'un ou l'autre des acteurs, et ce, en indiquant leur durée d'utilisation respective et leur fréquence d'utilisation relative par rapport à la durée totale des séquences. Nous croisons également cette variable avec la variable *Contexte de traitement des thèmes disciplinaires* de manière à mettre les principaux contextes dans lesquels ces ressources sont utilisées par les acteurs de la classe.

### 3.2.2.5 Les modalités d'organisation de la classe

L'analyse des pratiques d'enseignement du point de vue de cet indicateur vise à rendre compte des modalités d'organisation de la classe privilégiées par les enseignants lors de la mise en œuvre de leur séquence d'enseignement. Dans les travaux menés à grande échelle par les chercheurs du *Third International Mathematics and Science Study* (TIMSS) (Hiebert *et al.*, 2003 ; Roth *et al.*, 2006 ; Stigler et Hiebert, 2009 ; Stigler, Gonzales, Kawanaka, Knoll et Serrano, 1999), l'organisation de la classe est considérée comme une catégorie analytique importante pour évaluer le potentiel des pratiques d'enseignement des enseignants en relation avec les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine des sciences, technologies et mathématiques. Ces chercheurs distinguent deux modalités d'organisation de la classe possibles : le travail en classe entière (« whole class work ») et le travail indépendant (« independent work »).

Dans un travail de classe entière, on s'attend à ce que tous les étudiants fassent la même activité qui est dirigée par un enseignant, un élève, un petit groupe d'élèves ou une autre source (par exemple, une bande vidéo, un enseignant assistant). Les activités indépendantes impliquent que les élèves travaillent seuls, individuellement ou en petits groupes (Roth *et al.*, 2006, p. D-3)<sup>95</sup>

Tiberghien *et al.* (2008) reprennent les modalités d'organisation de la classe proposées par Roth *et al.* (2006), à savoir le travail en classe entière où s'effectuent des « apprentissages publics »

---

<sup>95</sup> Traduction libre : « In whole-class work, all students are expected to pay attention to the same activity that is led by teacher, a student, a small group of student, or another source (e.g., videotape, assistant teacher). Independent activities involve student working on their own, either individually or in small groups. ». (Roth *et al.*, 2006, p. D-3)

et le travail indépendant (individuel ou en équipes) où s'effectuent des « apprentissages privés ». Ces auteurs considèrent « que lorsque la classe travaille en grand groupe, le discours est public et parce que l'attention de toute la classe est en principe dirigée vers une source (enseignant ou autre), chacun des acteurs (enseignant et élèves) peut l'écouter et y contribuer. Dans le cas du travail individuel ou en petit groupe, le discours de l'enseignant est privé et limité à chacun de ces groupes (Tiberghien *et al.*, 2008, dans Bousadra, 2014, p. 134). Dans le travail indépendant (individuel ou en équipes), le rythme du travail est propre à chacun et les « productions privées peuvent jouer un rôle essentiel dans l'apprentissage des élèves du groupe, mais n'étant pas rendues publiques, elles ne peuvent pas être partagées » (Tiberghien *et al.*, 2008, p. 72).

Dans cette étude, nous nous appuyons sur le système catégoriel retenu par Roth *et al.* (2006) et Tiberghien *et al.* (2008), mais nous scindons la modalité d'organisation de la classe « travail indépendant » en deux modalités distinctes et, par conséquent, nous considérons que l'organisation de la classe peut prendre quatre modalités (Hasni *et al.*, 2015) : 1) le travail en grand groupe (ORG-GG) ; 2) le travail individuel (ORG-IN) ; 3) le travail en équipe (ORG-EQ) ; le travail selon une autre modalité (ORG-AUT).

Le travail en grand groupe (ORG-GG) correspond à tous les intervalles de temps de la séquence d'enseignement où l'enseignant s'adresse à l'ensemble de la classe en même temps, dans un but « d'apprentissage public ». Nous codons le début de ce type d'organisation dès le moment où l'enseignant s'adresse à tous les élèves de la classe, même lorsque la disposition des élèves est individuelle ou en équipes, et la fin de ce type d'organisation dès la consigne explicite de l'enseignant qui met fin au travail en grand groupe pour passer à une autre modalité d'organisation du travail. Par exemple, en réponse à une difficulté de compréhension constatée par l'enseignant chez deux élèves lors d'un laboratoire réalisé en équipes, l'enseignant donne une explication à tout le groupe. Dès le début de l'explication fournie par l'enseignant, nous codons la modalité d'organisation en grand groupe. Ainsi, ce n'est pas l'organisation physique de la classe qui dicte la modalité d'organisation de la classe. Cependant, lors d'un travail effectué individuellement ou en équipes, si l'enseignant s'adresse à un élève ou à des élèves d'une ou de plusieurs équipes, mais en parlant fort, ce qui peut laisser croire qu'il s'agit d'une intervention en grand groupe, la modalité d'organisation de la classe n'est pas pour autant en grand groupe. En d'autres mots, sans indice

explicite de la part de l'enseignant d'une demande d'arrêt du travail qui s'adresse à toute la classe, nous considérons que l'intervention de l'enseignant respecte le type d'organisation en cours.

Quant aux modalités d'organisation de la classe en travail individuel (ORG-IN) et en équipes (ORG-EQ), elles correspondent à tous les intervalles de temps de la séquence d'enseignement où les élèves travaillent respectivement individuellement et en équipes de deux élèves ou plus. Comme c'est le cas de la modalité d'organisation de la classe en grand groupe, nous codons le début de ces deux types d'organisation dès le moment où l'enseignant donne la consigne explicite aux élèves de travailler individuellement (ou en équipes), et la fin de ce type d'organisation dès le moment où l'enseignant s'adresse à l'ensemble de la classe, pour donner la consigne que le travail individuel (ou en équipes) est terminé ou pour faire une brève intervention de groupe.

Enfin, le travail selon une autre modalité (ORG-AUT) correspond à tous les intervalles de temps de la séquence d'enseignement qui ne sont pas associés au déroulement de la séance. Nous codons le début de ce type d'organisation dès le moment où il y a « perturbation » des autres modes d'organisation de la classe. C'est le cas d'un événement hors contexte comme l'arrivée d'une personne dans la classe, un message à l'interphone pendant la séance ou tout simplement lors de la prise de présences après avoir commencé la séance, etc. Nous codons le début de ce type d'organisation dès que l'enseignant annonce le début de la séance, ou lorsqu'il reprend la parole à la fin d'une « perturbation » et la fin de ce type d'organisation dès que l'enseignant annonce la fin de la séance, avant la fin officielle de celle-ci généralement déterminée par le son de la cloche. Nous décrivons la modalité d'organisation de la classe sur la base de la consigne explicite de l'enseignant lors de l'observation de l'enregistrement vidéo.

Comme c'est le cas pour les variables précédentes, le codage des modalités d'organisation de la classe a été réalisé par l'observation directe des enregistrements vidéos au moyen de la fonction de codage du logiciel *Transana*. Toutes les minutes des séquences ont été codées selon les modalités d'organisation de la classe observées.

Dans les résultats, nous produisons des tableaux qui mettent en évidence les modalités d'organisation en indiquant leur durée respective et leur fréquence relative par rapport à la durée

totale des séquences d'enseignement. Nous croisons également cette variable avec la variable *Contexte de traitement des thèmes disciplinaires* de manière à mettre en évidence les modalités d'organisation de la classe privilégiées dans les divers contextes de traitement des thèmes disciplinaires.

Les analyses menées à l'échelle mésoscopique s'inscrivent dans une double intention. La première consiste à donner un aperçu global de la manière avec laquelle les séances sont structurées ou construites autour des cinq indicateurs retenus. La seconde est de fournir des points de repère essentiels visant à situer et donner du sens aux analyses menées à l'échelle microscopique (Tiberghien *et al.*, 2007a).

### *3.2.2.6 Le synopsis comme enchaînement d'épisodes structurés par les indicateurs d'ordre mésoscopique*

La structuration des séances selon les cinq indicateurs d'ordre mésoscopique retenus permet de les découper en une suite de moments-clés dans lesquels les acteurs de la classe produisent des actions, discours et gestes cohérents en lien avec les thèmes disciplinaires en jeu, ce que Mortimer, Massicame, Tiberghien et Buty (2007) appellent les « épisodes ». Pour ces auteurs, un épisode est « un ensemble cohérent d'actions et de sens produits par les participants en interaction. Il a un clair commencement et une claire fin et peut être distingué des événements antérieurs et postérieurs. Normalement cet ensemble a aussi une fonction distinctive dans le discours » (Buty *et al.*, 2012, p. 155). Ainsi, les interactions langagières enseignant-élèves et élèves-élèves, que ce soit lors des « apprentissages publics » (avec la modalité d'organisation de la classe en grand groupe) ou lors des « apprentissages privés » (avec la modalité d'organisation de la classe en équipes) sont rythmées par une suite d'épisodes dont chacun forme un tout cohérent à l'intérieur des thèmes. Dans la construction des synopsis, les analyses menées à l'échelle mésoscopique ont conduit à décomposer les synopsis de séances en plusieurs épisodes.

À titre illustratif, **l'annexe 17** présente le synopsis de la séance 5 de l'enseignante 1. Ce synopsis montre que cette séance s'articule autour de 9 épisodes dont la modalité de la classe est

toujours en grand groupe et l'essentiel de cette séance consiste à donner de la « théorie »<sup>96</sup> sur les vecteurs, le mouvement rectiligne uniforme et le mouvement rectiligne uniformément accéléré. Outre les épisodes de gestion du travail (épisodes 29, 31, 34 et 36), la séance est initiée par l'épisode 30 sur le thème des vecteurs dans lequel l'enseignante fournit pendant environ une minute des explications sur le laboratoire *La souque à la corde scientifique* en l'absence de ressource didactique. Dans l'épisode 32, l'enseignante donne des notes de cours sur le mouvement rectiligne uniforme pendant environ 6 minutes. À l'épisode 33, elle poursuit ses notes de cours, mais sur le mouvement rectiligne uniformément accéléré pendant environ 11 minutes. À l'épisode 35, elle poursuit ses notes de cours, mais sur le thème des vecteurs (aspects mathématiques et application des vecteurs en physique) pendant un peu plus d'une quarantaine de minutes. La séance est clôturée par l'épisode 37 dans lequel l'enseignante et les élèves résolvent collectivement des exercices sur les vecteurs pendant environ 3 minutes.

Dans la production des résultats, nous donnons un aperçu des séquences d'enseignement du point de vue des cinq indicateurs d'ordre mésoscopique précédemment présentés. Ces synopsis sont présentés de manière séquentielle et succincte et mettent en relation les intentions pédagogiques explicitement déclarées par les enseignants lors des entrevues pré et postenregistrement ou celles énoncées aux élèves en classe. Elles servent à contextualiser et donner sens aux résultats à l'échelle microscopique (en termes de tâches épistémiques et de facettes de savoir) présentés dans les prochaines sections.

### 3.2.3 *L'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique*

Comme nous l'avons souligné précédemment, l'analyse des pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique, de l'ordre de la seconde ou de la minute, donne à voir dans le détail comment les savoirs disciplinaires circulent dans les pratiques d'enseignement. L'échelle microscopique est celle « des énoncés et des gestes des personnes » (Tiberghien *et al.*, 2007a), ce que Buty, Badreddine et Régner (2012) appellent le « temps interactionnel ». À cette échelle de granularité fine, il s'agit de voir quels sont les actions, discours et gestes des enseignants et des

---

<sup>96</sup> La sens que nous donnons ici à la théorie est défini dans l'[annexe 13](#).

élèves en relation avec le savoir en jeu. Nos analyses consistent, dans un premier temps, à décrire et comparer la manière avec laquelle la modélisation des phénomènes se manifeste à travers les tâches épistémiques (Collins et Ferguson, 1993 ; Ohlsson, 1996) en jeu dans la compréhension du monde matériel et les facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b) formulées par l'enseignant ou les élèves tout au long des séquences d'enseignement. Elles consistent, dans un second temps, à caractériser les pratiques d'enseignement de ces enseignants en les mettant en relation avec les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Ces analyses à l'échelle microscopique sont conduites sur l'ensemble des épisodes de chacune des séances des séquences d'enseignement des deux enseignants.

Contrairement à certains auteurs qui réservent l'analyse de pratiques d'enseignement à l'échelle microscopique seulement pour les moments où il y a des « apprentissages publics » (avec la modalité d'organisation de la classe en grand groupe), pour notre part, nous prenons également en compte les moments où il y a des « apprentissages privés » (avec les modalités d'organisation de la classe individuelle et en équipes). Comme nous l'avons souligné précédemment, nous avons adapté la modalité d'enregistrement vidéo selon les logiques d'enseignement des contenus disciplinaires retenues par les enseignants. Dans la classe de l'enseignant 2 où le milieu didactique diffère selon les groupes d'élèves de la classe (les élèves sont impliqués dans 8 laboratoires distincts et reçoivent des enseignements spécifiques à leurs laboratoires lors des multiples interventions de l'enseignant dans les équipes et des enseignements identiques lors des plénières), nous avons également fait le choix de centrer la caméra sur les interventions effectuées par l'enseignant et les élèves lorsque la modalité d'organisation de la classe en grand groupe (MOC-GG) s'appliquait, mais nous avons suivi les interventions de l'enseignant dans chacun des groupes tout au cours du déroulement de la séquence d'enseignement lorsque la modalité d'organisation de la classe en équipes (MOC-EQ) s'appliquait<sup>97</sup>. Nous justifions ce choix méthodologique par le fait que la modalité d'organisation de la classe en équipes est fortement privilégiée par l'enseignant 2 contrairement à l'enseignante 1.

---

<sup>97</sup> Bien que ce choix n'est pas explicitement exprimé dans le protocole d'enregistrement vidéo, nous l'avons précisé verbalement au technicien qui a procédé à l'enregistrement des séances.



Si nous sommes conscients que les « apprentissages privés » réalisés par les élèves lors des moments où ceux-ci travaillent individuellement ou en équipes peuvent être plus dispersés<sup>98</sup> que les « apprentissages publics » réalisés lors du travail en grand groupe, nous avons constaté qu’au cours des 8 premières séances en équipes de la séquence de l’enseignant 2, les élèves ont effectué des tâches de modélisation similaires ou identiques lors de la réalisation des laboratoires et que dans les 8 dernières séances en grand groupe, les élèves ont été appelés à exposer en grand groupe les principaux savoirs en jeu dans leur laboratoire respectif. Ces constats nous ont amené à considérer que, malgré la diversité des laboratoires proposés, les équipes d’élèves ont eu la possibilité d’effectuer des apprentissages comparables, du moins quant aux savoirs procéduraux. Que ce soit lors des « apprentissages publics » ou lors des « apprentissages privés », les analyses de pratiques d’enseignement effectuées à l’échelle microscopique ont été considérées sur le même plan. Dans les sous-sections suivantes, nous décrivons de manière plus détaillée les analyses de pratiques d’enseignement sous l’angle des tâches épistémiques et des facettes de savoir.

### 3.2.3.1 *L’analyse des pratiques d’enseignement sous l’angle des tâches épistémiques*

Comme nous l’avons souligné dans le cadre d’analyse, la construction du savoir en physique se fait au moyen de tâches épistémiques (Collins et Ferguson, 1993 ; Ohlsson, 1996) visant à caractériser les processus de pensée en jeu dans la compréhension du monde matériel tout au long des séquences d’enseignement. Nous avons par ailleurs soutenu que l’activité de modélisation constitue le fonctionnement essentiel de la physique et que cette activité implique des processus continus qui mettent en relation le « monde des théories et des modèles » (MTM) avec le « monde des objets et des événements » (MOE) (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien, Veillard, Le Maréchal, Buty et Millar, 2001 ; Tiberghien et Vince, 2005) (**figures 6 et 7**). Ces postulats nous ont conduit à dire que la compréhension du monde matériel par l’activité de modélisation en classe de physique nécessite d’engager les élèves dans des tâches épistémiques qui leur permettent non seulement de construire le registre empirique ou le registre théorique, mais également des relations entre ces deux registres. En d’autres mots, la maîtrise des

---

<sup>98</sup> Dans ces modalités d’organisation du travail, nous pensons que apprentissages réalisés par les élèves ont plus de chance d’être distincts d’une équipe d’élèves à l’autre ou d’un élève à l’autre en raison de la faible ou la non possibilité qui est offerte aux élèves de confronter leurs idées.

actions réalisées sur les objets (concrets et expérimentaux) du champ empirique, la connaissance des énoncés théoriques relatifs aux lois, principes et modèles du champ théorique ne sont pas suffisantes pour appréhender le monde matériel. Au-delà de l'appropriation de ces deux registres, il importe d'engager les élèves dans des activités de modélisation (notamment la construction de modèles) qui impliquent une double articulation entre le registre empirique et le registre théorique.

Si l'unité de découpage temporel retenu pour les analyses conduites à l'échelle mésoscopique est l'épisode, dans les analyses à l'échelle microscopique, ce sont les unités de sens (Bardin, 2007) qui permettent de faire le découpage temporel des tâches épistémiques en jeu. Ici, les unités de sens correspondent au plus court segment qui fait sens par rapport à la tâche épistémique appréhendée. L'unité de sens s'étale sur une longueur variable (une phrase ou un paragraphe) et sur une durée allant de quelques secondes à quelques minutes.

À la suite de Tiberghien (Tiberghien et Malkoun, 2007; Tiberghien *et al.*, 2007b), nous postulons que les pratiques d'enseignement en physique sont structurées par des tâches épistémiques et que leur configuration varie selon de nombreux indicateurs. Nous en décrivons trois de manière détaillée dans les paragraphes suivants.

*3.2.3.1.1 La nature des tâches épistémiques et leur niveau de complexité.* Pour dégager les tâches épistémiques en jeu dans les deux séquences d'enseignement, nous avons recouru à une analyse de contenu au moyen d'une grille thématique mixte (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996). La construction de cette grille a consisté en un processus d'allers-retours où il s'agissait d'identifier dans les pratiques des enseignants des tâches épistémiques préétablies dans des travaux antérieurs qui ont porté sur l'analyse des pratiques d'enseignement en physique dans le domaine de la dynamique au secondaire (Malkoun, 2007 ; Seck, 2007 ; Tachoua, 2005 ; Tiberghien et Buty, 2007 ; Tiberghien et Malkoun, 2007, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien *et al.*, 2007b)<sup>99</sup> et de faire émerger d'autres tâches épistémiques en s'appuyant sur les processus de pensée développés par Anderson et Krathwohl (2001) (Anderson *et al.*, 2001 ; Krathwohl, 2002 ; Wilson,

---

<sup>99</sup> Les descriptions des tâches épistémiques s'appuient en grande partie sur celles proposées dans la thèse de Malkoun (2007)

2013). Les travaux de ces auteurs consistent en une révision de la taxonomie de Bloom (Bloom et Krathwohl, 1956 ; Krathwohl, Bloom et Masia, 1964) et ouvrent la possibilité de catégoriser les tâches épistémiques en jeu dans la compréhension du monde matériel en fonction de leur niveau taxonomique. Ces travaux mettent en évidence des processus de pensée regroupés en six domaines de cognition croissants : se souvenir ou se rappeler (« remembering »), comprendre (« understanding »), appliquer (« applying »), analyser (« analyzing »), synthétiser / évaluer (« evaluating ») et créer (« creating ») ([annexe 15](#)).

Dans cette nouvelle taxonomie, les processus de pensée du domaine *Créer* sont d'un niveau plus élevé que ceux du domaine *Évaluer* comme le montre la [figure 21](#) qui compare la taxonomie de Bloom (Bloom et Krathwohl, 1956 ; Krathwohl, Bloom et Masia, 1964) et celle d'Anderson et Krathwohl (Anderson *et al.*, 2001 ; Krathwohl, 2002 ; Wilson, 2013).

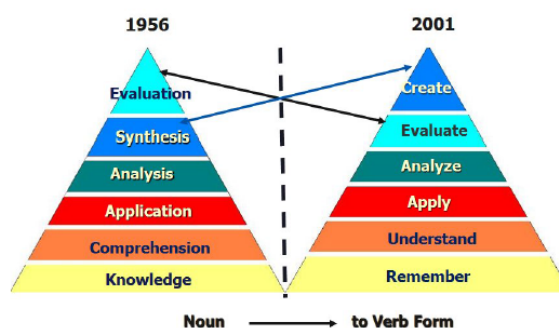


Figure 21- Comparaison entre l'ancienne taxonomie de Bloom et la taxonomie révisée de Bloom (Wilson, 2013)

Notre analyse des séquences d'enseignement des deux enseignants sous l'angle de la nature des tâches épistémiques a permis d'en dégager vingt-et-une. Elles sont définies sommairement dans le [tableau 2](#). Dans la section des résultats, nous exposons des exemples illustratifs de chacune de ces tâches selon les registres de modélisation qu'elles mobilisent par les acteurs de la classe dans les deux séquences d'enseignement.

Tableau 2 : Définition sommaire des tâches épistémiques en jeu dans les deux séquences d'enseignement

Tâches épistémiques	Définitions sommaires des tâches épistémiques
Argumenter	Chercher à faire admettre à un destinataire un argument que l'on croit vrai sachant que le destinataire partage ou non cet argument.
Classifier	Repartir des objets dans une catégorie dont les attributs sont préalablement définis.
Comparer	Rapprocher, mettre en parallèle ou établir des analogies entre des objets afin de mettre en lumière leurs ressemblances ou leurs différences selon certains critères établis.
Conclure	Arrêter ou fixer des énoncés au terme d'un processus, d'une démarche ou d'une procédure.
Décrire	Fournir des détails sur un objet, un événement, un processus, etc. en vue de rendre compte de certains des traits caractéristiques de celui-ci.
Déduire	Tirer des conséquences d'un processus, d'une démarche ou d'une procédure.
Définir	Délimiter, circonscrire ou formuler le sens d'un objet en recourant à des attributs caractéristiques essentiels. L'objet peut être un concept, un modèle, un principe, une loi, une règle ou tout autre élément théorique.
Énoncer	Exprimer oralement ou par écrit une règle, une procédure, etc.
Évaluer (juger/critiquer),	Examiner un objet, un argument, une proposition, une procédure, une démarche, un résultat, etc. en vue de juger de sa validité ou de faire ressortir ses qualités ou ses défauts.
Exemplifier	Donner du sens à un objet en l'illustrant par un exemple.
Expliquer	Chercher à rendre intelligibles ou compréhensibles à un destinataire un objet, une définition, un argument, etc.
Faire des opérations formelles	Opérer en recourant à divers registres de représentation sémiotique, notamment algébrique et vectoriel.
Généraliser	Passer du particulier au général, étendre, appliquer quelque chose à un ensemble.
Générer	Produire ou concevoir quelque chose.
Identifier	Reconnaître un objet à une catégorie dont les attributs sont clairement définis.
Interpréter	Donner du sens ou tirer une signification d'un objet, d'un événement, d'un processus, etc.
Mesurer	Déterminer la valeur d'une grandeur physique à l'aide d'un instrument de mesure.
Prédire	Annoncer une chose comme devant se produire, par connaissance inductive ou rationnelle des causes et des effets.
Représenter	Traduire des données dans un registre de représentation sémiotique : iconique, schématique, tabulaire, graphique, algébrique, vectoriel, etc.
Sélectionner	Choisir, retenir au sein d'un ensemble, des objets qui possèdent des caractéristiques déterminées et qui conviennent du point de vue du locuteur.
Simuler	Produire artificiellement à l'aide d'un système ou d'un instrument de mesure les données d'un phénomène à modéliser.

Durant une séquence d'enseignement, la modélisation des phénomènes engage l'enseignant et les élèves dans une grande diversité de tâches épistémiques. Nous avons évoqué dans le cadre conceptuel que la complexité des activités de modélisation peut varier sur un continuum dont la moins complexe pourrait consister en une simple utilisation d'un modèle et la plus complexe pourrait consister en une construction d'un nouveau modèle, et ce, en passant entre les deux par des activités de modélisation de complexité moyenne comme la comparaison, l'évaluation, et la

révision de modèles (Crawford et Cullin, 2004 ; Gilbert, 2004 ; Johsua et Dupin, 1989, 2003 ; Martinand, 1992, 1994 ; Robardet et Guillaud, 1997 ; Schwarz *et al.*, 2009 ; Schwarz et White, 2005 ; Van Joolingen, 2004). Nous postulons que les activités de modélisation nécessaires à la compréhension du monde matériel impliquent, de la part de l'enseignant et des élèves, le recours à des tâches épistémiques dont le niveau taxonomique est particulièrement élevé, par exemple celles qui consistent à engager les élèves dans la construction et l'évaluation de modèles. Comme le montre le **tableau 3**, les 21 tâches épistémiques en jeu dans les séquences d'enseignement des deux enseignants peuvent être réparties dans les 6 domaines de cognition proposés par Anderson et Krathwohl (Anderson *et al.*, 2001 ; Krathwohl, 2002 ; Wilson, 2013).

Tableau 3 : Répartition des tâches épistémiques en jeu dans les séquences d'enseignement des deux enseignants selon les six domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl

Domaines de cognition	Tâches épistémiques en jeu dans la compréhension du monde matériel
Niveau 1 : se souvenir ou se rappeler	ÉNONCER
Niveau 2 : comprendre	DÉCRIRE, DÉFINIR, EXEMPLIFIER, EXPLIQUER, IDENTIFIER, INTERPRÉTER, SÉLECTIONNER
Niveau 3 : appliquer	FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, MESURER, SIMULER
Niveau 4 : analyser	CLASSIFIER, COMPARER ET REPRÉSENTER
Niveau 5 : synthétiser / évaluer	ARGUMENTER, CONCLURE, DÉDUIRE, ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER), GÉNÉRALISER, PRÉDIRE
Niveau 6 : Créer	GÉNÉRER

3.2.3.1.2 *Les registres de modélisation mobilisés dans les tâches épistémiques.* Notre positionnement épistémologique sur la modélisation nous conduit à distinguer trois grandes catégories de tâches épistémiques selon leur registre de modélisation. Ces catégories permettent d'analyser très finement les activités menées par les élèves ou l'enseignant.

1. Les *tâches épistémiques qui portent sur le MOE* visant la connaissance des objets (expérimentaux et physiques) et la maîtrise des actions réalisées sur ces objets dans le champ empirique au sein d'évènements pertinents recouvrant les phénomènes physiques à l'étude. Dans ces tâches, les objets sont accessibles directement par l'observation ou indirectement par l'expérimentation au moyen de matériel et d'appareils de mesure. À la suite de Grandy (1992) qui définit la mesure comme étant une observation technique et la positionne sur un plan proche des observations et de Picavet (1995) qui accorde à celle-ci un statut proche de l'observation à laquelle elle ne fait qu'apporter une précision quantitative, nous incluons dans le MOE, comme le fait

également Bécu-Robinault (2005), toutes les tâches liées au recueil des données quantitatives (par la mesure de grandeurs physiques diverses) sur les objets et les événements au moyen d'appareils de mesures spécialisés. Les tâches épistémiques suivantes relèvent du MOE : décrire du matériel ou un protocole de laboratoire, expliquer le fonctionnement d'un appareil de mesures, simuler un phénomène, sélectionner une procédure de recueil de données pertinente, mesurer l'évolution de la position d'un objet en chute libre à l'aide d'un chronomètre à étincelles.

2. Les *tâches épistémiques qui portent sur le MTM* visant la connaissance des objets théoriques, c'est-à-dire les constructions abstraites telles que les concepts ou les modèles qui soutiennent l'étude des situations matérielles, et sont reliés les uns aux autres par des principes, règles et lois du monde des théories et des modèles. Ces tâches impliquent l'expression de propositions théoriques relatives au système explicatif de l'enseignant ou des élèves. Elles englobent toutes les tâches que Bécu-Robinault (2005) situe soit au niveau du modèle physique, soit au niveau du modèle mathématique. Le niveau du modèle physique inclut les représentations symboliques associées aux modèles physiques telles que les schémas, les graphiques, les relations numériques ou algébriques entre les grandeurs physiques, les unités de grandeurs conventionnelles ou non conventionnelles ainsi que les relations entre ces unités. Quant au niveau du modèle mathématique, il est lié au traitement mathématique des données, par les outils propres aux mathématiques considérées comme discipline outils pour (ou au service de) la physique. À ce niveau, les actions menées par les acteurs de la classe ne font pas explicitement référence à la signification des nombres manipulés du point de vue des grandeurs physiques. Les tâches épistémiques suivantes relèvent du MTM : énoncer une définition d'un concept physique, comparer deux modèles distincts pour illustrer un même référent, générer une hypothèse sur le comportement d'un phénomène, expliquer les caractéristiques d'un modèle, calculer le taux de variation d'une courbe entre deux instants rapprochés, prédire un résultat numérique en recourant à une extrapolation des données d'un graphique, etc.

3. Les *tâches épistémiques qui mettent en relation le MOE et le MTM* visant à établir des relations bidirectionnelles entre les objets du MOE et les objets du MTM. Ces tâches ont pour objectif la construction et l'utilisation de modèles en lien avec les situations matérielles à l'étude. Les modèles étant considérés comme objets intermédiaires entre phénomènes et théories et comme

opérateurs sélectifs de la réalité, ces tâches donnent lieu à des interprétations du monde réel dans la langue de la physique. Elles font intervenir des processus de pensée allant du MOE vers le MTM, c'est-à-dire du concret vers l'abstrait ou du Particulier vers l'Universel. Il peut s'agir de concevoir un modèle à partir de données expérimentales en s'appuyant sur des ressources théoriques, de concevoir une expérience permettant de valider un modèle, de sélectionner un modèle qui représente le mieux algébriquement, graphiquement ou vectoriellement le comportement d'un phénomène. Dans un autre sens, ces tâches font intervenir des processus de pensée allant du MTM au MOE, de l'abstrait vers le concret ou bien de l'Universel vers le Particulier. Il peut s'agir d'évaluer la validité d'un modèle dans une nouvelle situation matérielle, de prédire des événements dans le champ empirique à l'aide d'un modèle ou encore de sélectionner des ressources théoriques appropriées en vue d'analyser une situation matérielle.

Ainsi, les tâches épistémiques peuvent se décliner dans l'un ou l'autre des 3 registres de modélisation comme l'illustre le **tableau 4** avec la tâche épistémique *Évaluer* dont les exemples sont tirés de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1.

Tableau 4 : Exemples de tâches épistémiques Évaluer selon les trois registres de modélisation

<b>Définition sommaire de la tâche épistémique</b>	Examiner un objet, un argument, une proposition, une procédure, une démarche, un résultat, etc. en vue de juger de sa validité ou de faire ressortir ses qualités ou ses défauts
<b>Registres de modélisation</b>	<b>Exemples</b>
<b>MOE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluer une cause d'erreur dans un laboratoire (S8, ens. 1)</li> <li>• Évaluer une description de la vitesse ou de la variation de la vitesse d'une balle lors de son mouvement ascendant ou descendant (S1 et S10, ens. 1)</li> <li>• Évaluer la pertinence de facteurs expérimentaux pouvant influencer le mouvement (vitesse ou accélération) d'une balle sur le plan incliné (S11, ens. 1)</li> </ul>
<b>MTM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluer une définition ou une comparaison entre la vitesse instantanée et la vitesse moyenne (S1, S7, S7, ens. 1)</li> <li>• Évaluer le type de relation mathématique associée à la variation de la position d'un mobile en MRUA (S7, ens. 1)</li> <li>• Évaluer une procédure pour composer ou recomposer un vecteur dans le plan cartésien (S2, ens. 1)</li> </ul>
<b>Relation entre le MOE et le MTM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Évaluer une exemplification d'un mobile dont l'accélération scalaire est constante (S2, ens. 1)</li> <li>• Évaluer l'appartenance d'un événement à une vitesse instantanée (S7, ens. 1)</li> <li>• Évaluer le tracé d'un graphique vitesse-temps qui représente un événement (skieur qui descend une pente) (S7, ens. 1)</li> </ul>

Relevons que les tâches épistémiques ne sont pas nécessairement mutuellement exclusives. Une même action en classe, de la part de l'enseignant ou des élèves, peut engendrer plus d'une tâche épistémique à la fois.

*3.2.3.1.3 La prise en charge des tâches épistémiques par les acteurs de la classe.* Outre la caractérisation des tâches épistémiques selon leur nature et leur niveau de complexité, la question de la prise en charge de ces tâches par les acteurs en vue de la modélisation des phénomènes nous apparaît essentielle. Si la modélisation des phénomènes de la physique nécessite d'engager les élèves dans des tâches épistémiques portant sur le MOE, sur le MTM ou mettant en relation ces deux mondes, nous postulons qu'une telle activité de modélisation dans une perspective constructiviste doit donner le plus possible aux élèves l'occasion de prendre en charge ces tâches épistémiques. Rappelons à ce sujet Martinand (1996, p. 7), qui dit que les activités de modélisation en classe doivent être centrées sur des « processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou en partie », et non sur « les modèles plus ou moins “arrangés” que nous pouvons leur présenter au nom de la science ou des programmes ».

La question du partage des responsabilités dans les tâches épistémiques en vue de la construction du savoir est centrale. Au cours d'une séquence d'enseignement, il y a négociation entre l'enseignant et les élèves de la répartition de ces tâches au sein d'un contrat didactique que l'enseignant établit avec les élèves. Les positions que peut prendre chacun des acteurs de la classe envers le savoir correspondent à ce que certains auteurs (Chevallard, 1999 ; Mercier *et al.*, 2002) appellent la « topogénèse ». Ces positions sont nécessairement évolutives avec le temps d'enseignement et elles dépendent de la chronogénèse (Mercier *et al.*, 2002) : à chaque instant de celle-ci, « le professeur et les élèves occupent un lieu précis, un topos, c'est-à-dire accomplissent un ensemble de tâches, dont certaines sont spécifiquement liées à la position de professeur, et d'autres à la position d'élève. À chaque instant de la chronogénèse correspond un état de la topogénèse » (Sensevy et Quilio, 2002, p. 50). La topogénèse pose la question du qui ? Plus précisément, comment qui ? constitue un analyseur privilégié de la nature « conjointe » de l'action didactique (Sensevy, 2007, p. 32). Nous retrouvons cette même idée de la répartition des responsabilités par rapport au savoir chez d'autres auteurs (ex. : Cobb, Gresalfi et Hodge, 2006 ; Mortimer et Scott, 2003 ; Scott *et al.*, 2006). Chez Cobb *et al.* (2006, p. 8), c'est le concept de



« distribution of authority » qui est utilisé pour décrire la responsabilité des acteurs dans la construction du savoir en mathématiques : « L'autorité concerne le niveau d'implication qui est accordé aux élèves dans la prise de décision quant à l'interprétation des tâches et l'évaluation du caractère plausible des méthodes utilisées et des solutions. L'autorité porte donc sur le “qui est en charge” en termes des contributions mathématiques »<sup>100</sup>. Selon ces auteurs, l'autorité peut être partagée entre l'enseignant et les élèves dans une classe où l'enseignant et les élèves jugent ensemble de la légitimité des réponses en donnant des arguments mathématiques. Dans une autre classe, l'autorité peut être attribuée uniquement à l'enseignant qui juge seul de la légitimité des réponses des élèves.

La prise en charge des tâches épistémiques constitue un indicateur de premier choix pour caractériser la singularité et le potentiel des pratiques d'enseignement sur l'engagement des élèves dans les processus de modélisation. Dans une démarche de modélisation s'inscrivant dans une logique constructiviste, les tâches épistémiques devraient être prises en grande partie par les élèves ou conjointement par l'enseignant et les élèves, alors que dans une démarche de modélisation s'inscrivant dans une logique transmissive, les tâches épistémiques devraient être prises en grande partie par l'enseignant.

Nos analyses, en regard de cet indicateur, ont été conduites de manière à mettre en évidence : 1) les acteurs de la classe (l'enseignant, les élèves ou le manuel scolaire) qui prennent en charge les tâches épistémiques en relevant plus particulièrement celles qui sont davantage du côté de l'enseignant et celles qui sont davantage du côté des élèves ; 2) les positions que prennent ces acteurs par rapport à ces tâches en relevant celles qui sont « sollicitées par... » et celles qui sont « réalisées par... », et ce, en mettant en évidence les registres de modélisation décrits précédemment.

---

<sup>100</sup> Traduction libre : « Authority concerns the degree to which students are given opportunities to be involved in decision making about the interpretation of tasks, the reasonableness of solution methods, and the legitimacy of solutions. Authority is therefore about “who’s in charge” in terms of making mathematical contributions ». (Cobb *et al.*, 2006, p. 8)

Comme c'est le cas pour l'analyse des données qui relèvent d'autres dimensions de la pratique d'enseignement (conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle), nous avons recouru à une analyse de contenu au moyen d'une grille thématique mixte (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996) en suivant rigoureusement les trois phases chronologiques proposées par Bardin (2007, p. 125) : « 1) la pré-analyse ; 2) l'exploitation du matériel ; 3) le traitement des résultats, l'inférence et l'interprétation ». Le codage des tâches épistémiques a été fait en temps réel avec le logiciel *Transana*.

Dans les résultats, nous produisons des tableaux et des figures qui mettent en évidence chacun des indicateurs retenus pour décrire les tâches épistémiques mobilisées dans les séquences : leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus ou selon des thèmes disciplinaires particuliers) ; la durée totale et la durée moyenne qui leur sont réservées ; leur densité (nombre de tâches épistémiques par minute) selon les thèmes disciplinaires ; leur prise en charge en considérant les acteurs de la classe (élèves, enseignant ou manuel scolaire), d'une part, et le rôle que ces acteurs jouent en regard de celles-ci (tâches suscitées ou réalisées), d'autre part ; les registres de modélisation qu'elles mobilisent.

### 3.2.3.2 *L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des facettes de savoir*

Comme nous l'avons déjà souligné, nous faisons l'hypothèse que les acquisitions conceptuelles des élèves en physique se font par l'appropriation de petits éléments de connaissance et résultent d'une mise en relation entre ces éléments de connaissance impliqués dans le savoir enseigné et d'autres éléments de connaissance déjà acquis ou intégrés dans le réseau cognitif des élèves (Bange, 1992 ; Küçüközer, 2000, 2005 ; Malkoun, Vince, Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a). Nous postulons par ailleurs que la compréhension des phénomènes en physique ne se manifeste pas uniquement lors de l'énonciation des définitions formelles des savoirs disciplinaires par l'enseignant, mais tout au long de la séquence d'enseignement par des énoncés formulés par l'enseignant et les élèves, ce que certains auteurs désignent par l'expression « facettes de savoir » (« Facet of knowledge ») (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a).

Sur le plan méthodologique, nous considérons comme Tiberghien *et al.* (2007a, p. 5) qu'« une facette correspond à un énoncé (une phrase) qui sert de référence à l'analyse des productions discursives et permet ainsi de renvoyer un énoncé effectif à un énoncé considéré comme ayant la même signification ». Ainsi, les énoncés décrivant les facettes de savoir sont formulés sous une forme générale, de manière à ne pas prendre en compte les contextes particuliers. Par exemple, pour ce qui est de la production verbale « la pierre qui est lancée dans les airs subit au départ une accélération négative », dans notre formulation, nous ne prenons pas en compte le cas particulier de la pierre, mais nous adoptons la formulation générale « tout objet qui est lancé dans les airs subit au départ une accélération négative », et ce, afin de ne pas se retrouver avec une infinité de facettes suivant les champs d'application. Les facettes de savoir sont repérées à travers les discours de classe, les productions écrites et les gestes de l'enseignant et des élèves. C'est grâce à ce découpage du savoir, à un niveau de granularité très fin (et sans se limiter à l'analyse à ce niveau) que nous analysons la relation entre l'enseignement et l'apprentissage.

En classe de physique, le savoir peut s'exprimer à travers plusieurs registres de représentation sémiotique. Si chacun de ces registres apporte une information spécifique à un savoir disciplinaire donné, c'est la compréhension globale et intégrative de l'ensemble des représentations symboliques qui donne sens à ce savoir (Duval, 1993, 1995 ; Malkoun, 2007 ; Tiberghien et Vince, 2005). En outre, si les savoirs disciplinaires peuvent être exprimés au-delà des facettes conceptuelles, nous pensons que leur expression à travers les facettes procédurales symboliques (algébriques, graphiques, vectorielles, etc.) peut favoriser l'appropriation de ces savoirs. Dans cette thèse, nous distinguons quatre catégories facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Malkoun, 2007 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a) : les facettes de savoir conceptuelles, procédurales, symboliques et langagières.

En postulant que les acquisitions conceptuelles des élèves en physique se font par petits éléments de connaissance et résultent d'une mise en relation entre ces éléments impliqués dans le savoir enseigné et d'autres éléments de connaissance déjà acquis ou intégrés dans le réseau cognitif des élèves (Bange, 1992 ; Küçüközer, 2000, 2005 ; Malkoun, Vince et Tiberghien, 2007 ; Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien *et al.*, 2007b), cela a des conséquences sur le choix du découpage du savoir pour analyser les apprentissages conceptuels des élèves par rapport au savoir enseigné en jeu dans les séquences d'enseignement. Si nous

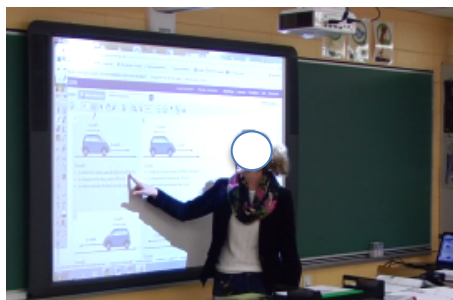
considérons, par ailleurs, que les élèves ne peuvent s'approprier d'un seul coup le réseau conceptuel associé au savoir enseigné, il s'avère nécessaire de décomposer finement le savoir enseigné de manière à pouvoir analyser la progression du savoir (chronogénèse) dans une séquence d'enseignement et sa maîtrise par les élèves au terme de cette séquence. Ce choix de décomposition du savoir en petits éléments de connaissance nous conduit à prendre l'unité minimale de discours qui a un sens de manière autonome. Comme c'est le cas pour l'analyse des tâches épistémiques, ce sont donc les unités de sens (Bardin, 2007) qui permettent de faire le découpage temporel des facettes de savoir en jeu. Ici, les unités de sens correspondent au plus court segment qui fait sens par rapport à la facette de savoir appréhendée. L'unité de sens s'étale sur une longueur variable (une phrase ou un paragraphe) et sur une durée allant de quelques secondes à quelques minutes.

Pour dégager les facettes de savoir en jeu dans les séquences d'enseignement, nous avons recouru à une analyse de contenu au moyen d'une grille thématique mixte (Bardin, 2007 ; Landry, 1994 ; Van der Maren, 1996). Le repérage des facettes de savoir et la formulation générique de ces facettes ont été réalisés en nous appuyant sur les quatre catégories de facettes de savoir précédemment décrites, et en triangulant les données de plusieurs sources : le savoir de référence de la physique cinématique, le savoir à enseigner prescrit dans le curriculum, le savoir à enseigner véhiculé dans les matériels didactiques utilisés par les enseignants et les élèves, les productions verbales et écrites et les gestes de l'enseignant et des élèves véhiculés dans les enregistrements vidéos. Comme c'est le cas pour l'analyse des données qui relèvent des autres dimensions de la pratique d'enseignement (conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle), nous avons appliqué la méthode d'analyse de contenu (Bardin, 2007).

La phase de préanalyse a consisté en une lecture « lecture flottante » (Bardin, 2007) des transcriptions relatives à chacune des séances des séquences d'enseignement. Sur le plan opérationnel, nous avons effectué, sur les transcriptions imprimées, un premier repérage des facettes de savoir qui circulent à travers les discours et gestes des acteurs de la classe. Ce repérage consistait, pour chacune des facettes de savoir, à identifier la thématique qui lui est associée en fonction de groupes de savoirs de cinématique prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire ainsi que sa catégorie d'appartenance (facettes conceptuelle, symbolique, procédurale et langagière). Ce repérage consistait également à identifier explicitement les frontières (début et fin) associées à ces facettes au moyen de crochets fermés. Cette phase de préanalyse a conduit à la

construction d'une grille thématique préliminaire pour l'analyse des facettes de savoir, grille structurée autour des groupes de savoirs de cinématique prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire : position, déplacement, distance parcourue, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération, accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement temps, mouvement rectiligne uniforme et mouvement rectiligne uniformément accéléré, mouvement balistique. Dans une perspective d'analyse des pratiques d'enseignement en vue de les relier aux facettes de savoir en jeu dans la classe, nous postulons, à la suite de Tiberghien (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b), que la compréhension et l'appropriation des savoirs conceptuels de cinématique par les élèves peut varier selon au moins trois variables : la continuité du savoir, la densité du savoir et la prise en charge de ce savoir par les acteurs de la classe. La continuité du savoir et la densité du savoir sont des indicateurs qui visent à décrire le rythme d'introduction des facettes de savoir dans l'enseignement. Dans leur analyse du savoir en jeu, Tiberghien et ses collègues (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b) recourent à ces deux indicateurs afin « d'établir des comparaisons entre les séances, les thèmes ou des ensembles de thèmes, d'une même classe et entre les classes. Plusieurs rythmes peuvent être établis » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 22). À ces trois indicateurs, nous en ajoutons trois autres comme hypothèses : l'ancrage de la facette dans le contexte de traitement des thèmes disciplinaires, la source d'émergence de la facette de savoir et l'ancrage de la facette selon les phases de la démarche de modélisation.

La **figure 22** montre un exemple de codage de deux facettes conceptuelles sur le signe de la variation de la vitesse effectué à partir d'une transcription de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 où celle-ci recourt à une situation fictive impliquant une voiture qui augmente sa vitesse dans le sens de référence.



### Codage avec *Transana*

**Type de facette :** facette conceptuelle  
**Ancrage thématique :** accélération  
**Contexte de traitement :** théorie  
**Source d'émergence :** situation fictive & ressource didactique  
**Ancrage dans la démarche de modélisation :** hors démarche  
**Prise en charge :** Enseignant

**Situation : une voiture qui augmente sa vitesse dans le sens de la référence (vers la droite) à l'échelle horizontale**

**P : (Interpréter-MOE-MTM-R)** Alors quand mon mobile se déplace vers l'axe des  $x$ , vers les positifs, ma variation de position est positive, ma voiture est en train d'augmenter sa vitesse. Si je fais ma variation de vitesse, j'obtiens un positif. (FC) ☐

**(Déduire-MTM-R)** Si mon delta  $v$  est positif, alors je n'ai pas le choix, mon accélération est positive. C'est beau ? (FC) ☐

Un mobile qui augmente sa vitesse dans le sens de la référence (vers la droite) sur l'axe des  $x$  a une **variation de vitesse positive**

Un mobile qui augmente sa vitesse dans le sens de la référence (vers la droite) sur l'axe des  $x$  a une **accélération positive**

Figure 22- Exemple de codage de deux facettes conceptuelles sur le signe de la variation de la vitesse dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

**3.2.3.1.1 La continuité du savoir.** La continuité du savoir, « traduit la reprise, dans le savoir enseigné, d'un élément déjà introduit. Cette notion est liée à une hypothèse d'apprentissage : certains éléments de savoir vont être d'autant mieux appris par les élèves qu'ils sont repris dans le savoir enseigné. Cependant, compte tenu de la diversité possible de "l'apprenabilité" de ces éléments, la reprise d'un élément ne conduit pas nécessairement à son apprentissage. » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 51). Dans cette perspective de caractérisation de la dynamique du savoir enseigné, la reprise des éléments de savoir « peut correspondre soit à un temps d'enseignement supérieur, mais aussi à une plus grande variété des mises en relation d'un élément de connaissance. » (*Ibid.*, p. 35). Pour déterminer la continuité du savoir, ces auteurs calculent « le nombre de facettes d'un certain type réutilisées dans des thèmes en rapport avec le nombre de facettes du même type introduites dans un thème antérieur. » (Tiberghien *et al*, 2007a, p. 22). Ce calcul nécessite de distinguer une facette correspondant à un élément de savoir introduit pour la première fois dans la classe (une nouvelle facette) d'une facette correspondant à un élément de savoir déjà introduit (une facette réutilisée) (Tiberghien et Malkoun, 2007).

La prise en compte du critère de continuité du savoir implique la nécessité de considérer la temporalité liée à l'introduction des facettes de savoir au cours d'une séquence d'enseignement, ce qui correspond à ce que certains auteurs (Chevallard, 1999 ; Mercier *et al.*, 2002) appellent la « chronogénèse ». Comme le signalent Sensevy et Quilio (2002, p. 50), le savoir enseigné est un savoir disposé sur l'axe du temps, c'est un « savoir-temps ». Enseigner, pour eux, c'est « parcourir avec les élèves une séquence, une suite orientée d'objets de savoir, qui établit ce que les professeurs nomment la progression » (*Ibid.*, p. 50). C'est cette progression dans le temps du savoir en classe qui définit la chronogénèse (Mercier *et al.*, 2002 ; Sensevy, 2007 ; Sensevy et Quilio, 2002).

La chronogénèse « pose la question du quand ? Plus précisément comment quand ? Elle incite à identifier la nature et les raisons du passage, à un certain moment, d'un contenu épistémique à un autre » (Sensevy, 2007, p. 32). Si la continuité du savoir peut être étudiée à différentes échelles temporelles, c'est au niveau de la séquence d'enseignement et de la séance de classe qu'elle est considérée dans cette étude. Afin de caractériser les pratiques d'enseignement de manière globale, la continuité des facettes est établie de manière à voir celles qui émergent le plus souvent dans les pratiques des enseignants et comment elles sont distribuées au niveau de la séquence. Afin de relier les facettes de savoir aux acquisitions conceptuelles chez les élèves, la continuité des facettes est établie et associée à des questions spécifiques déterminées, et ce, de manière à voir si une plus grande continuité des facettes de savoir facilite les acquisitions conceptuelles chez les élèves.

Si contrairement à Tiberghien et ses collègues, nous ne distinguons pas les éléments de nouveaux savoirs introduits des éléments de savoirs mobilisés, nous considérons cependant qu'au cours de la séquence d'enseignement, les facettes de savoir peuvent être reprises un certain nombre de fois dans un même champ d'application (ou un même thème) ou un nouveau champ d'application (un nouveau thème). Comme la continuité du savoir contribue à déterminer la mémoire didactique de la classe (Mercier *et al.*, 2005), la mise en évidence de la continuité de certaines facettes constitue une caractéristique importante de l'action conjointe de l'enseignant et des élèves en relation avec nos hypothèses d'apprentissage du savoir en physique. Nos analyses en regard de la continuité du savoir ont été conduites de manière à mettre en évidence la fréquence d'apparition des facettes de savoir associées aux groupes de concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (position, déplacement, distance parcourue, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération,

accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré et mouvement balistique). Ces analyses permettent de relever les facettes de savoir qui apparaissent le plus souvent dans l'enseignement selon les séances et selon les thèmes disciplinaires en jeu dans les séquences d'enseignement, qu'elles soient nouvellement introduites ou réutilisées. Certains résultats de ces analyses sont repris afin de caractériser la relation entre l'enseignement et les acquisitions conceptuelles chez les élèves. Nous établissons le degré de continuité des facettes de savoir sur la séquence (ensemble des séances) avec l'échelle suivante : continuité très faible (0 à 4) ; continuité faible (5 à 9) ; continuité moyenne (10 à 14) ; continuité forte (15 à 19) ; continuité très forte (20 et +).

*3.2.3.1.2 La densité du savoir.* La densité du savoir, « vise à connaître dans quelle mesure le savoir nouveau est introduit de manière régulière ou par à-coups » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 35). L'introduction du savoir pouvant se faire de manière continue ou discontinue, il apparaît qu'une introduction continue des facettes de savoir favorise les apprentissages conceptuels chez les élèves (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b). En postulant que le rythme d'introduction d'éléments nouveaux de savoir peut se faire régulièrement ou de manière discontinue et que celui-ci joue un rôle dans la vie de la classe et dans le rapport des élèves au savoir, ces auteurs calculent « le nombre de facettes correspondant à des éléments de savoir nouveau introduit en classe entière divisé par la durée du thème (en minutes). Cette densité se situe sur l'ensemble de la partie dynamique de la séquence ; on a donc un lien entre les analyses aux trois échelles : macroscopique (la séquence), mésoscopique (les thèmes) et microscopiques (les facettes) » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 43). Autrement dit, la densité du savoir consiste à calculer « le nombre de facettes d'un ou de plusieurs types en rapport avec une durée de l'enseignement pour un thème, une série de thèmes ou une séquence. » (Tiberghien *et al.*, 2007a, p. 22). Nos analyses en regard de la densité du savoir ont été conduites de manière à mettre en évidence la densité des groupes de facettes (nombre de facettes introduites d'un même groupe à l'heure) selon les séances (tous les thèmes disciplinaires confondus) et la densité de ces mêmes groupes de facettes selon des thèmes disciplinaires particuliers. Nous établissons le degré de densité des groupes de facettes de savoir selon les séances ou les thèmes disciplinaires sur la séquence (ensemble des séances) avec l'échelle suivante : densité très faible [ 0, 10 [ ; densité faible [ 10, 20 [ ; densité moyenne [ 20, 30 [ ; densité forte [ 30, 40 [ ; densité très forte [ 40 et +.



*3.2.3.1.3 L'ancrage de la facette dans le contexte de traitement des thèmes disciplinaires.* Dans notre analyse des facettes de savoir, nous nous intéressons au contexte de traitement des thèmes disciplinaires dans lequel les facettes prennent ancrage. Dans une logique constructiviste de l'enseignement, nous postulons que le savoir en physique ne doit pas seulement émerger des moments de théorisation et d'exercisation comme ce pourrait être le cas dans un enseignement de la physique traditionnel basé sur la transmission du savoir et centré sur la résolution de problèmes d'application. L'adoption d'une logique constructiviste de l'enseignement de la physique implique d'engager les élèves dans des laboratoires leur permettant de construire des savoirs de cette discipline. Nos analyses, en regard de cet indicateur, ont été conduites de manière à mettre en évidence les contextes de traitement des thèmes disciplinaires en référence à ceux retenus précédemment comme indicateur d'ordre mésoscopique : gestion du travail, théorie, exercices (réalisation ou correction), laboratoires (explications, réalisation, correction). Ces contextes sont décrits à l'[annexe 13](#).

*3.2.3.1.4 La source d'émergence du savoir.* La source dans laquelle les facettes de savoir prennent ancrage est également un indicateur d'ordre microscopique important. Au cours d'une séquence d'enseignement, les facettes de savoir peuvent émerger de manière décontextualisée sans référence à un contexte particulier, dans des situations fictives, dans des démonstrations expérimentales, dans des situations expérimentales ou encore par le biais des ressources didactiques. Si les facettes de savoir émergent au sein des situations expérimentales, c'est-à-dire de situations empiriques dans lesquelles les élèves recueillent et organisent des données en vue de la compréhension d'un phénomène, nous pensons que l'acquisition des savoirs conceptuels en jeu sera d'autant plus facilitée que si elles émergent de manière décontextualisée ou par le biais du manuel scolaire. Nous faisons cette hypothèse en considérant que la compréhension des phénomènes en sciences, plus particulièrement en physique, nécessite d'engager les élèves dans des situations expérimentales aidant à mettre en relation le « monde des théories et des modèles » (MTM) avec le « monde des objets et des événements » (MOE) (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien, Veillard, Le Maréchal, Buty et Millar, 2001 ; Tiberghien et Vince, 2005). Ce sont de telles situations qui incitent les élèves à procéder à des expériences mesurables sur des phénomènes en sélectionnant des objets et événements appropriés pour étudier ces phénomènes, d'une part, et en

traitant les éléments théoriques correspondant aux objets et événements retenus en vue de décrire avec les mots de la physique les phénomènes étudiés, d'autre part (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011). À ce sujet, Veillard, Tiberghien et Vince (2011), en s'appuyant sur Hacking (2005/1983), stipulent qu'en physique, les expérimentations, qu'elles soient initiées par des hypothèses théoriques ou par des observations dans le monde réel, sont des activités fondamentales de toute formation scientifique et ne peuvent être remplacés par la mémorisation de faits donnés.

Nos analyses, en regard de cet indicateur, ont été conduites de manière à mettre en évidence la source d'émergence du savoir qui peut prendre cinq modalités possibles : 1) *décontextualisée* où la facette est formulée par un ou plusieurs acteurs de la classe sans prendre appui sur un contexte particulier ; 2) *ressource didactique* où la facette est formulée en prenant appui sur une ressource didactique quelconque : manuel scolaire, cahier d'apprentissage, note de cours, etc. ; 3) *démonstration expérimentale* où la facette est formulée sur la base d'une analyse de données ou de faits tirés d'une démonstration visant à faire « la monstration » d'un savoir quelconque ; 4) *situation expérimentale* où la facette est formulée sur la base d'une analyse de données ou de faits tirés d'une expérimentation concrète menée sur des objets et événements du monde matériel, laquelle est conduite par les élèves ; 5) *situation fictive* où la facette est formulée sur la base d'une analyse de données ou de faits tirés d'une situation menée sur des objets virtuels par exemple, la simulation du mouvement d'une voiture avec un logiciel de simulation. Notons que ces catégories ne sont pas nécessairement mutuellement exclusives. Ainsi, si un élève fait la lecture d'une définition non contextualisée de la notion d'accélération dans le manuel scolaire : « L'accélération est une grandeur physique qui établit un rapport entre une variation de vitesse et une variation de temps », cette définition sera codée par la facette de savoir conceptuelle générique « L'accélération scalaire est le rapport entre la variation de la vitesse scalaire et la variation du temps » et prendra deux modalités : décontextualisée et ressource didactique. De même, si l'enseignant utilise une simulation informatique proposée par une maison d'édition pour construire la signification d'une accélération négative en montrant une voiture qui se déplace dans le sens contraire de la référence (vers la gauche sur l'axe des  $x$ ) tout en augmentant sa vitesse, et ce, en mettant en évidence le graphique accélération-temps qui se construit de manière dynamique tout au cours de son déplacement, cette simulation sera codée par la facette de savoir conceptuelle générique « Un mobile qui augmente sa vitesse dans le sens contraire de la référence (vers la gauche sur l'axe des  $x$ ) ».

a une accélération négative » et par la facette de représentation graphique générique « Le graphique accélération-temps d'un mobile en MRUA qui diminue sa vitesse dans le sens de référence est une droite horizontale négative », lesquelles prendront les deux mêmes modalités : situation fictive et ressource didactique.

*3.2.3.1.5 L'ancrage de la facette dans les phases de la démarche de modélisation.* L'analyse des pratiques d'enseignement du point de vue de cet indicateur vise à rendre compte de la manière avec laquelle les facettes de savoir émergent en dehors ou au sein d'une démarche de modélisation, et dans le second cas dans quelle(s) phase(s) de cette démarche, elles émergent. Si les facettes de savoir sont la plupart du temps introduites par l'enseignant avant la démarche de modélisation, cette démarche s'inscrit davantage dans une logique inductiviste (transmissive) alors que si elles sont formulées par les élèves au cours ou au terme de la démarche, celle-ci s'inscrit davantage dans une logique constructiviste en raison de sa double finalité quant à la conceptualisation qui est produite comme nous l'avons souligné dans le cadre conceptuel : la démarche permet non seulement l'élaboration conceptuelle d'un modèle associé au phénomène physique à l'étude, mais aussi la formulation d'énoncés scientifiques par les élèves qui s'appuient sur ce modèle afin de représenter, décrire, expliquer et prédire le phénomène en question. Nos analyses, en regard de cet indicateur, ont été conduites de manière à mettre en évidence les phases de la démarche de modélisation en référence à celles retenues dans le cadre conceptuel : problématiser (PRO), planifier (PLA), investiguer (INV), conceptualiser et déployer (CONC-DEP) ou autres phases (AUT). Cet indicateur permet de décrire la distribution des groupes de facettes selon les phases de la démarche de modélisation.

*3.2.3.1.6 La prise en charge du savoir par l'enseignant et les élèves.* Durant une séquence d'enseignement, les facettes de savoir peuvent être introduites par l'enseignant, les élèves ou de manière conjointe par l'enseignant et les élèves. Bien que les élèves n'acquièrent pas nécessairement les savoirs dans l'ordre précis de leur introduction comme nous l'avons évoqué dans le cadre d'analyse, nous pensons que s'ils ont l'opportunité de participer activement à leur formulation, ils ont plus de chance de les comprendre et de se les approprier (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b). Ce critère met en exergue la nécessité de considérer, comme c'est le cas des tâches épistémiques, la position de chacun des acteurs dans la formulation

des facettes de savoir, ce qui renvoie à la topogénèse (Chevallard, 1999 ; Mercier *et al.*, 2002), concept similaire à ce que d'autres (ex. : Cobb, Gresalfi et Hodge, 2006 ; Mortimer et Scott, 2003 ; Scott *et al.*, 2006) appellent la répartition des responsabilités par rapport au savoir. Comme c'est le cas pour les tâches épistémiques, nous postulons que la prise en charge des facettes de savoir selon les acteurs de la classe joue un rôle déterminant dans le niveau d'appropriation des savoirs en jeu : plus l'opportunité est donnée aux élèves de prendre en charge la formulation des facettes de savoir, que ce soit au sein des démarches de modélisation ou en dehors de celles-ci, meilleures sont leurs chances de s'approprier les savoirs en jeu. La prise en charge des facettes de savoir constitue donc un indicateur essentiel pour caractériser l'activité de modélisation en classe selon qu'elle s'inscrit dans une logique transmissive ou constructiviste.

Nos analyses, en regard de cet indicateur, ont été conduites de manière à mettre en évidence les acteurs responsables de la formulation des facettes de savoir avec trois modalités possibles (catégories mutuellement exclusives) : 1) *formulation par l'enseignant* dans le cas où les attributs caractéristiques de la facette en vue de sa construction sont avancés uniquement par l'enseignant ; 2) *formulation par l'élève* dans le cas où les attributs caractéristiques de la facette en vue de sa construction sont avancés uniquement par un ou des élèves ; 3) *formulation conjointe par l'enseignant et les élèves* dans le cas où chacun des deux acteurs contribue à l'insertion d'au moins un attribut caractéristique de la facette lors de sa formulation.

À la phase subséquente de la préanalyse, celle de l'exploitation du matériel, nous avons procédé au codage des facettes de savoir proprement dit. Le codage de ces facettes a été fait en temps réel avec le logiciel *Transana* en considérant les indicateurs d'ordre microscopique présentés précédemment. Une fois le codage des facettes de savoir réalisé, nous avons utilisé la fonction recherche du logiciel d'analyse multimédia *Transana* de manière à générer tous les résultats en lien avec les indicateurs retenus. Ces résultats ont été ensuite archivés dans des collections dont la structure arborescente peut être gérée de manière dynamique selon les objectifs poursuivis, en créant notamment de nouvelles catégories ou sous-catégories que nous pouvons considérer comme de nouvelles variables. Ainsi, dans le répertoire des collections de *Transana*, nous créons la catégorie « facette de savoir Accélération » qui comporte les sous-catégories : « facettes de savoir conceptuelles Accélération », « facettes de savoir procédurales Accélération », « facettes de savoir

symboliques-représentations algébriques », « facettes de savoir symboliques-représentations graphiques », « facettes de savoir symbolique-représentations vectorielles », « facettes de savoir symbolique-symboles » et « facettes de savoir symbolique-unités ». Puis, par la fonction « Produire un rapport sur la collection », nous produisons des rapports statistiques sommaires pour chacune des variables à l'étude. Ces rapports statistiques sommaires rassemblent tous les extraits codés pour les variables retenues, et fournissent pour chacun des extraits, des indications sur leur localisation (numéro de la séance, période temporelle, et présence d'un hyperlien qui donne directement accès à l'extrait dans l'enregistrement vidéo), leur fréquence d'apparition et leur durée dans la séquence d'enseignement (voir un exemple de rapport à l'[annexe 16](#)). Comme les unités de sens peuvent être codées par plusieurs variables et leurs modalités respectives, les rapports statistiques sommaires produits par *Transana* donnent accès à des résultats issus du croisement de plusieurs variables.

En recourant à cette même méthode d'analyse, nous avons produit des rapports statistiques sommaires sur chacune de facettes de savoir en jeu dans la séquence d'enseignement. Ces rapports nous donnent un aperçu sur la manière dont chacune des facettes est introduite dans la séquence d'enseignement, en considérant les mêmes indicateurs d'ordre microscopique. Les données issues des rapports statistiques sommaires sur les collections et sous-collections nous ont permis d'aboutir à la construction de matrices des facettes de savoir associées aux groupes de concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (position, déplacement, distance parcourue, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération, accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré, mouvement balistique) ([annexes 19 et 20](#)). Ces matrices ont été d'une grande utilité dans la production des résultats.

### **3.3 Le traitement des données issues du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique**

Comme nous l'avons souligné précédemment, notre étude consiste en une étude exploratoire et descriptive visant à caractériser et comparer la singularité des pratiques d'enseignement de deux enseignants de manière à dégager leur potentialité concernant la prise en charge des processus de

modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique (chute libre, mouvements d'objets matériels sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.). Cette différenciation nous conduit à relier certaines caractéristiques des pratiques de modélisation favorables aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Dès lors, le traitement des données issues du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique prend toute son importance. Si nous ne considérons pas pour autant que la relation entre enseignement et apprentissage soit directe en raison de la multiplicité des variables qui peuvent influencer les pratiques d'enseignement, nous postulons que les pratiques d'enseignement ont des effets importants sur les apprentissages des élèves et qu'il est possible de déterminer des caractéristiques de ces pratiques qui favorisent les apprentissages conceptuels chez les élèves.

Considérant que la plupart des savoirs visés au programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire sont nouveaux, nous n'avons pas administré de questionnaires préenregistrement pour mesurer les connaissances initiales des élèves avant la mise en œuvre des séquences d'enseignement. Seul un questionnaire postenregistrement a été administré. Ainsi, notre procédure ne consiste pas en une analyse quantitative classique dont l'opération est de mesurer des écarts entre les performances des élèves à un prétest et un posttest en recourant à un test de signification. Cependant, afin de nous assurer dans la mesure du possible que les groupes d'élèves ont des compétences en physique comparables, nous avons évalué la perception qu'ils ont du degré de facilité de la physique (cinématique) (**tableau 5**) ainsi que leur sentiment de compétence par rapport aux autres élèves dans ce domaine (**tableau 6**) (voir à ce sujet les questions 28 et 29 du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique à l'**annexe 11**). Le **tableau 5** montre que la physique cinématique semble être un domaine difficile ou plus ou moins facile pour la majorité des élèves des deux groupes (78 % pour le groupe 1 et 89 % pour le groupe 2). Lorsqu'on demande aux élèves de se situer par rapport aux autres élèves de leur groupe quant à leurs compétences dans le domaine de la physique cinématique (sentiment de compétence personnelle) en comparaison avec les autres élèves en général, une proportion similaire des élèves des deux groupes considère qu'ils sont moyens ou faibles en physique (63 % pour le groupe 1 et 66 % pour le groupe 2) (**tableau 6**). Ces autoévaluations font ressortir que les deux groupes d'élèves ont approximativement la même perception du degré de facilité de la physique (cinématique) et en

plus, un sentiment de compétence comparable dans ce domaine. Ces autoévaluations sont en adéquation avec l'appréciation générale portée par les deux enseignants sur leur groupe élèves respectif, à savoir qu'ils les considèrent comme étant des « groupes réguliers » comportant une bonne proportion d'« élèves moyens ». Par ces appréciations, nous faisons l'hypothèse que les deux groupes d'élèves ont un niveau de compréhension similaire de la physique et ont un potentiel d'apprentissage sensiblement équivalent avant la mise en œuvre des séquences d'enseignement.

Tableau 5 : Appréciation du niveau de facilité de la physique cinématique par les élèves des deux groupes

Pour moi, la physique (cinématique) que l'on fait à l'école est :	N Groupe 1 (enseignante 1)	N Groupe 2 (enseignant 2)
difficile	7 (26 %)	3 (17 %)
plus ou moins facile	14 (52 %)	13 (72 %)
facile	6 (22 %)	2 (11 %)
très facile	0 (0 %)	0 (0 %)

Tableau 6 : Sentiment de compétence d'élèves en physique cinématique dans les deux groupes

Comparé aux autres élèves de ma classe, je considère que je suis :	Groupe 1 (enseignante 1)	Groupe 2 (enseignant 2)
faible en physique (cinématique)	7 (26 %)	4 (22 %)
moyen en physique (cinématique)	10 (37 %)	8 (44 %)
bon en physique (cinématique)	6 (15 %)	6 (33 %)
très bon en physique (cinématique)	4 (15 %)	0 (0 %)

Afin de relier les caractéristiques des pratiques d'enseignement aux acquisitions conceptuelles des élèves, nous comparons dans un premier temps la distribution des réponses et le pourcentage d'élèves des deux classes ayant répondu adéquatement à chacune des questions à réponses multiples du questionnaire d'enquête. Pour chacune des questions, nous générons les matrices des facettes de savoir simplifiées de chacun de ces groupes. Les indicateurs retenus dans ces matrices vont au-delà des deux indicateurs retenus par Tiberghien et ses collègues (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b), soit la continuité et la densité du savoir. Ils concernent

la continuité du savoir (fréquence d'apparition des facettes), l'ancrage des facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, la source d'émergence du savoir, l'ancrage des facettes selon les phases de la démarche de modélisation et la prise en charge du savoir par les acteurs de la classe. Le repérage de ces facettes de savoir se fait au moyen de matrices des facettes de savoir correspondant à chacun des groupes concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire présentées aux [annexes 19 et 20](#). Nous expliquons les pourcentages de réussite à ces questions (acquisitions conceptuelles) selon les indicateurs retenus en prenant en compte l'« apprenabilité » des éléments de savoir dans l'apprentissage de la physique (Tiberghien et Makoun, 2007). En effet, les éléments de savoir ne s'apprennent pas tous de la même façon. Ils ont des « différences d'apprenabilité ». Le coût cognitif pour l'apprentissage d'un élément de savoir peut être plus petit ou plus élevé qu'un autre selon le groupe dans lequel il s'insère (*Ibid.*, p. 34) : « Cette condition sur le groupe d'insertion est essentielle, car le sens d'un élément ne s'apprend pas de manière isolée, les liens pour construire le sens sont donc liés au coût cognitif. Ceci nous conduit à poser la question de ce que nous appelons "l'apprenabilité" des éléments (ou de groupe d'éléments) ». Si certains éléments de savoir peuvent être mieux appris que d'autres simplement en raison d'un temps d'enseignement plus important, en revanche, l'apprentissage d'autres éléments de savoir ne peut s'expliquer uniquement par une durée d'enseignement ou une introduction plus importante de ces éléments de savoir dans la classe. D'autres facteurs comme la complexité des savoirs en jeu, les conceptions initiales des élèves ou des conditions d'enseignement particulières pourraient interférer sur la construction du sens de ces éléments par les élèves. Ainsi, les causes d'une meilleure performance dans un groupe d'élèves peuvent être de nature multifactorielle. À la suite de Tiberghien et Malkoun (2007), nous présentons les résultats mettant en relation les pratiques d'enseignement aux acquisitions conceptuelles des élèves en portant une attention particulière aux éléments de savoirs reconnus comme difficiles par les didacticiens de sciences ou par les enseignants eux-mêmes dans l'apprentissage de la physique. Toutefois, pour les éléments de savoir dont nous ne connaissons pas véritablement le coût cognitif associé à leur apprentissage, nous postulons que ces éléments sont « apprenable avec un enseignement adapté au sens où une majorité d'élèves devrait les acquérir » (Tiberghien et Malkoun, 2007, p. 45).



En guise de synthèse, la **figure 23** illustre le cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en physique. Deux volets d'analyse sont considérés. Le premier consiste à caractériser les pratiques d'enseignement sous l'angle de quatre dimensions. Une analyse de contenu thématique est effectuée au moyen du logiciel *NVivo* sur les données issues des dimensions conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle. Pour la dimension opérationnelle, nous recourons au triplet de genèse pour analyser les pratiques d'enseignement à trois échelles du temps didactique. Les analyses mésoscopiques et microscopiques englobent un nombre important d'indicateurs. Les analyses en termes de facettes de savoir permettent la construction de matrices de facettes de savoir pour chacun des groupes de concepts prescrits de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire. Les données relatives à cette dimension sont traitées au moyen du logiciel *Transana*. Dans le second volet d'analyse, nous mettons en relation les pratiques d'enseignement avec les acquisitions conceptuelles des élèves par le biais de matrices de facettes de savoir associées aux items du questionnaire d'enquête.

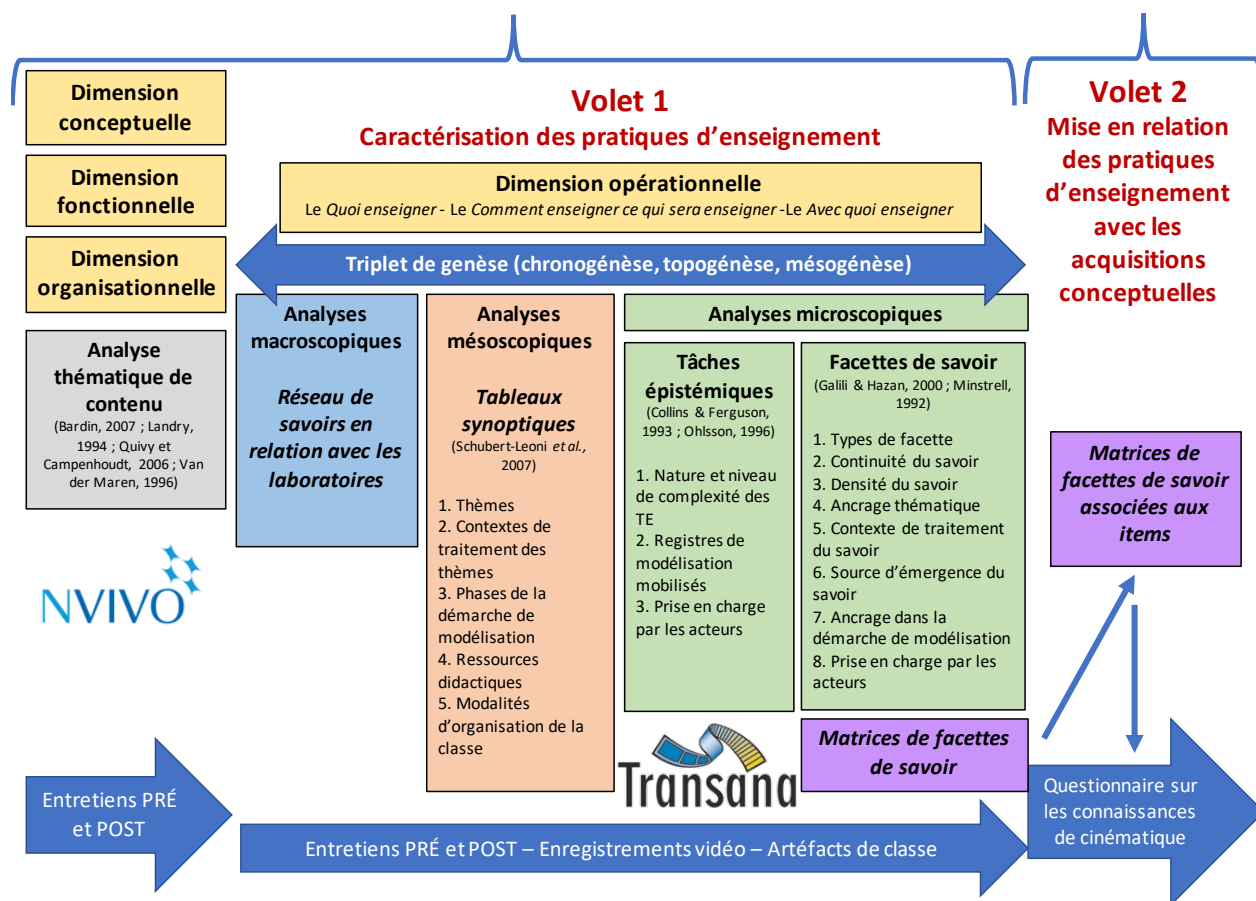


Figure 23- Cadre d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation en physique

## CINQUIÈME CHAPITRE : LES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE

Dans cette section, afin de faciliter la lecture du lecteur, nous présentons les résultats de chacun des enseignants de manière linéaire, selon l'ordre chronologique des questions spécifiques de recherche énoncées au terme du cadre conceptuel. Plus précisément, nous exposons dans un premier temps les résultats associés à chacune des quatre dimensions d'analyse des pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation retenues, et dans un second temps, les résultats associés à la relation entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves dans chacune des classes respectives. Sur le plan de la forme, afin de réduire l'ampleur du manuscrit, nous avons fait le choix de présenter les résultats par blocs dans certaines sections, en exposant les descriptions textuelles suivies de leurs figures correspondantes (tableaux, graphiques ou schémas). Considérant la quantité importante des résultats, nous avons opté pour une présentation des résultats suivant une structure régulière. Dans la discussion, les résultats sont repris, comparés et discutés à la lumière de la problématique, du cadre conceptuel et de divers travaux, en particulier dans le champ de la didactique des sciences.

### 1. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1

#### 1.1 Conception d'un modèle chez l'enseignante 1

L'enseignante 1 conçoit le modèle comme une représentation simplifiée de la réalité qui permet de représenter de manière non unique un phénomène quelconque par une grande diversité de registres de représentation sémiotique : représentations algébriques, tabulaires, graphiques, vectorielles, iconiques ; dispositifs matériels concrets ; simulations informatiques (**tableau 7**). En tant que représentation simplifiée de la réalité ( $N=1$ )<sup>101</sup>, le modèle est d'abord une représentation destinée pour soi, pour le modélisateur et pas nécessairement pour d'autres destinataires. Le modèle est une représentation non unique d'un phénomène ( $N=2$ ). Dans son enseignement, elle mise sur la complémentarité des modèles pour représenter une même situation et invite les élèves à les

---

<sup>101</sup>  $N = 1$  signifie ici que l'enseignante a exprimé une seule fois cette idée dans l'ensemble des entrevues.

comparer. Pour elle, la complémentarité des modèles constitue un moyen de différenciation pédagogique pour favoriser les apprentissages des élèves. Le modèle comme objet pouvant être représenté par des registres de représentation sémiotique divers (N=27) figure de loin parmi les caractéristiques les plus évoquées chez l'enseignante 1. Les formules mathématiques et les représentations graphiques sont les registres de représentation sémiotique les plus souvent rapportés pour l'expression des modèles dans le discours de cette enseignante. Les représentations algébriques (formules ou équations mathématiques) associées au modèle du MRU et au modèle du MRUA sont d'une grande utilité pour calculer les valeurs des variables du mouvement (position, vitesse et accélération) de mobiles dans différentes situations. Dans son enseignement, cette enseignante s'assure de faire la démonstration de l'origine de ces formules, lesquelles sont déduites des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps de mobiles en MRU ou en MRUA comme nous le verrons plus loin. Quant aux représentations graphiques, elles servent à représenter dans un espace à une dimension (sur une droite numérique) ou à deux dimensions (dans le plan cartésien) au moyen des tracés position-temps, vitesse-temps et accélération-temps, le mouvement de mobiles dans différentes situations réelles ou fictives, lesquelles impliquent un MRU ou un MRUA. Pour cette enseignante, l'étude du mouvement de mobiles se fait tout autant lors de l'analyse ou de la construction de graphiques ; ces deux tâches permettant de manipuler des variables en vue de caractériser le mouvement de ceux-ci. Dans l'analyse des graphiques, les élèves doivent être en mesure de déduire des informations comme la vitesse d'un mobile en calculant les taux de variation du tracé de son graphique position-temps ou la variation de la vitesse de ce même mobile en calculant l'aire sous la courbe de son graphique accélération-temps. Du côté des représentations vectorielles, elles soutiennent également la modélisation de divers phénomènes. À ce sujet, deux contextes d'application des vecteurs sont énoncés par l'enseignante : la modélisation d'un système de forces impliquant des vecteurs forces fixes et un vecteur équilibrant (voir le laboratoire sur les vecteurs *La souque à la corde scientifique* dans la séance 4) et la modélisation du mouvement de mobiles dans des référentiels à deux dimensions (référentiel à points cardinaux, plan cartésien, référentiel mixte) au moyen des vecteurs déplacement, vitesse et accélération, notamment pour la description du mouvement des projectiles. Quant aux dispositifs matériels concrets, même s'ils n'ont pas été fréquemment cités par l'enseignante (N=1), ceux-ci sont considérés comme essentiels pour la modélisation du mouvement de mobiles en MRU et en MRUA. Si pour elle, les représentations graphiques ou iconiques proposées dans le manuel scolaire

ou les simulations informatiques que nous pouvons trouver sur Internet sont nécessaires à la compréhension de ces mouvements, elles demeurent néanmoins insuffisantes. En effet, dans les séances 1, 2, 7 et 10, elle utilise à plusieurs reprises le charriot de laboratoire pour modéliser le mouvement de mobiles dans différentes situations dans le cadre de démonstrations expérimentales. Enfin, elle accorde le statut de modèle à la démarche scientifique (N=1) et la démarche de résolution de problèmes (N=1).

Tableau 7 : Conception d'un modèle chez l'enseignante 1

<b>Un modèle est...</b>
<b>1. une représentation simplifiée de la réalité (N=1)</b>
Un modèle ce <b>n'est pas tout le temps la réalité</b> , mais c'est la réalité qui se colle de façon la plus proche de la réalité. Aussi un modèle doit être <b>représentatif pour soi</b> et pas nécessairement pour les autres. (Ent pré 1, ens 1)
<b>2. une représentation non unique d'un phénomène (N=2)</b>
P : Si on est capable d' <b>avoir au moins deux modèles</b> possibles pour une même situation, je trouve ça encore mieux. Puis d'être capable en plus <b>de comparer les deux modèles</b> . Si on est capable de faire ça dans ma tête à moi, on a un bon modèle (...) Puis, j'essaie le plus souvent possible d' <b>avoir deux, si possible trois types de modèles</b> différents pour essayer de rejoindre les types d'apprentissages de mes élèves (Ent pré 1, ens 1)
<b>3. représenté par des registres de représentation sémiotique divers comme... (N=27)</b>
<i>a) des représentations algébriques (formules ou équations mathématiques) (N=9)</i> P : Bien si on pense à un modèle comme étant une formule mathématique c'est la <b>formule qui nous permet de calculer la vitesse, la vitesse moyenne, la vitesse instantanée</b> , puis la formule qui nous permet de calculer l' <b>accélération d'un mobile</b> . (Ent pré 1, ens 1)  P : Bien oui je vais leur expliquer par démonstration au tableau d'où viennent les <b>formules mathématiques du mouvement rectiligne uniformément accéléré</b> . Donc après ça, ça sera à eux de les utiliser, mais je vais leur démontrer d'où elles viennent. (Ent pré 3, ens 1)  P : Bon alors <b>si on prend une équation mathématique comme étant un modèle</b> , c'est certain qu'ils vont avoir à travailler avec les formules : les manipuler, les utiliser dans différents contextes, avec les différentes situations problèmes qui seront données. (Ent pré 4, ens 1)
<i>b) des représentations graphiques (N=8)</i> P : Au niveau des modèles, je viens de penser que j'ai oublié de parler d'une grosse partie qui est quand même importante. C'est que régulièrement je vais faire référence à des <b>types de représentation graphique du mouvement</b> . Je ne vais pas l'enseigner puis faire faire des exercices là-dessus pour le moment, mais je vais souvent y référer. Ce qui fait qu' <b>en termes de modèles, c'est vrai que je vais utiliser les représentations graphiques</b> . (Ent pré 1, ens 1)  P : Ensuite, si on a, si on prend encore une fois <b>un graphique comme étant un modèle</b> , bien oui ils devront <b>analyser les graphiques</b> , être capable de retrouver les informations qu'il y a dans un graphique que ce soit la pente ou l'aire sous la courbe. (Ent pré 4, ens 1)
<i>c) des représentations vectorielles (N=5)</i> P : Au <b>niveau des modèles</b> , bien je crois que le laboratoire [ <i>La souque à la corde scientifique</i> ] était une super belle façon de <b>démontrer ce que représente un vecteur</b> . (Ent post 2, ens 1)  P : L'autre niveau, c'est ce que je disais tout à l'heure : le <b>mouvement en deux dimensions</b> . Donc être capable, ils ont déjà la notion d'un mouvement en deux dimensions, tout le monde le connaît, mais [...] comment on va

intégrer ça juste un petit peu après en termes de vecteurs. Donc un **vecteur vitesse, déplacement ou accélération**, de comprendre que ça peut représenter justement un mobile qui se déplace à la fois en  $x$  et en  $y$ , de voir ça dans un graphique. (Ent pré 4, ens 1)

P : Puis si on prend encore une fois un **vecteur comme étant modèle mathématique**, bien un modèle en fait, donc ils vont devoir si je me rends là, ils vont devoir **analyser le mouvement d'un projectile en termes de vecteurs**. Donc oui ils vont devoir mobiliser des notions puis les appliquer à un modèle. (Ent pré 4, ens 1)

*d) des dispositifs matériels concrets (N=1)*

P : Bon [...] je ne pourrai pas me baser uniquement sur le matériel que j'ai, le manuel. Ça ne serait pas suffisant. **J'ai besoin de démontrer avec du matériel très très simple, mais du matériel physique**, des repères dans la classe, **un petit modèle comme là j'avais un petit charriot en métal**, mais il faut rajouter ça au matériel au manuel que j'ai parce que dans le manuel, ce sont des dessins donc il n'y a pas de mouvement impliqué. J'aurais pu aller chercher tout plein tout plein d'animations sur Internet parce qu'il en existe tout plein, mais je pense que rien n'équivaut en fait de prendre une petite voiture puis la faire déplacer concrètement devant les élèves pour ce type de démonstration là. (Ent post 1, ens 1)

#### **4. une démarche scientifique (N=1)**

P : Il y a eu aussi une autre chose. C'est qu'ils ont fait des manipulations de laboratoire au dernier cours puis là éventuellement ils font un rapport de laboratoire. Donc je dirais le **modèle des étapes de la démarche scientifique**. (Ent pré 1, ens 1)

#### **5. une démarche de résolution de problèmes (N=1)**

P : Je dirais que **les modèles proposés pour la résolution de problèmes** par exemple sont un peu complexes. Ça perd un petit peu l'élève plutôt que de l'aider à comprendre. (Ent pré 3, ens 1)

## **1.2 Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1**

L'enseignante 1 appréhende la démarche de modélisation dans trois contextes différents (**tableau 8**). Dans le premier contexte, celle-ci est mise en œuvre à travers la résolution de problèmes d'application. En effet, dans la première entrevue préenregistrement, après que l'enseignante ait énuméré ses principales tâches et celles des élèves pour les trois premières séances, nous lui avons demandé : « Est-ce qu'au cours des périodes qui seront enregistrées, toi ou tes élèves êtes appelés à certains moments, à recourir à une démarche qui vise de manière spécifique l'acquisition des modèles ? ». En réponse à cette question, celle-ci se réfère à une démarche de résolution de problèmes en cinq étapes qui consiste à identifier les données pertinentes, identifier la donnée recherchée, sélectionner la formule mathématique à utiliser, calculer en appliquant cette formule et trouver une réponse. Ainsi appréhendée, la démarche de modélisation consiste à appliquer un modèle et est mobilisée dans les moments de réalisation ou de correction d'exercices en équipe ou grand groupe, lesquels couvrent une grande partie de la séquence d'enseignement, soit un peu plus de 30 % du temps total de la séquence dans les séances 1, 2, 3, 5, 7, 9, 10 et 11. En lien avec la démarche énoncée, nous avons demandé à l'enseignante de décrire dans un ordre

chronologique les principales phases (ou moments forts) de cette démarche en précisant ses tâches ainsi que celles de ses élèves au moment de la réalisation. Les mêmes étapes sont citées auxquelles elle ajoute une étape de validation de la réponse. Au moment de lui demander de caractériser une démarche de modélisation, elle présente celle-ci comme étant une démarche sous forme d'étapes (celles rapportées dans la démarche de résolution de problème) visant à développer la compréhension des élèves et dans laquelle ceux-ci sont appelés à mobiliser et comparer au moins deux modèles pour représenter une situation. Dans l'entrevue présenseignement 2, elle réitère cette même démarche, mais elle fait aussi référence à un second contexte où la démarche de modélisation prend le sens d'une démarche expérimentale dans laquelle les élèves sont appelés à modéliser un système de forces. Il s'agit plus précisément du laboratoire *La souque à la corde scientifique* où les élèves modélisent une situation en référence à un jeu dont le but est de tirer sur trois cordes reliées à un anneau de façon à ce que celui-ci soit centré par rapport à une tige centrale et où chaque participant tire sur une corde différente dans trois directions différentes et afin qu'il reste centré par rapport à cette tige. La démarche consiste à représenter par des vecteurs forces les actions de personnes qui tirent sur cet anneau et à rechercher expérimentalement et théoriquement l'équilibre de trois systèmes avec un vecteur équilibrant. À partir des deux premières forces identifiées, ils procèdent par essais et erreurs afin de représenter expérimentalement la troisième force des trois systèmes en jeu. Ils recueillent leurs données dans un tableau et recourent aux méthodes algébrique et graphique d'addition vectorielle afin de déterminer le vecteur équilibrant théorique et le comparer au vecteur équilibrant expérimental. Dans cette démarche de modélisation qui est mobilisée dans les séances 4, 5, 6, et 9, il y a construction d'un modèle expérimental et confrontation de ce modèle avec un modèle théorique. Bien que le laboratoire *Descente sur un plan incliné* dans les séances 8 et 11 pourrait solliciter le recours à une démarche expérimentale, l'enseignante n'en fait pas du tout référence. Enfin, le troisième contexte où il y a démarche de modélisation est évoqué dans la troisième entrevue préenregistrement. Il s'agit des moments où l'enseignante analyse et construit en grand groupe les graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps de mobiles en MRUA et des moments où elle construit à partir de ces graphiques les principales formules ou équations mathématiques de ces mouvements. Dans cette démarche de modélisation qui est mobilisée dans les séances 5, 7, 8, 9, 10 et 11, il y a analyse et construction de modèles. Selon elle, la démarche de modélisation serait mobilisée dans la totalité des séances. Cela qui justifie pour nous le fait d'analyser les pratiques d'enseignement des modèles

et de la modélisation dans la continuité. Cependant, à la lumière de notre cadre conceptuel, nous considérons qu'il n'y a véritablement démarche de modélisation qu'à partir du moment où nous pouvons identifier un processus cyclique comportant au moins certaines phases parmi les quatre phases suivantes : problématiser ; planifier ; investiguer ; conceptualiser et déployer. De notre point de vue, ce sont les contextes où l'enseignante fait explicitement référence à la démarche expérimentale qui s'apparentent le plus à la démarche de modélisation.

Tableau 8 : Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

<b>La démarche de modélisation est...</b>
<b>1. une démarche de résolution de problèmes d'application</b>
P : Bien si c'est moi qui suis en train de le faire au tableau là, la plupart du temps je demande à un élève de lire le problème, puis de me <b>trouver les données dans l'énoncé du problème</b> . À ce moment-là, si je suis d'accord bien j'écris les données au tableau au fur et à mesure où il me le dit. Ensuite, je lui demande d' <b>identifier ce que l'on cherche</b> . Ensuite, je lui demande d' <b>identifier les formules que l'on pourrait utiliser</b> à l'aide des données qu'on a puis de ce qu'on cherche. Ensuite, <b>on fait le calcul</b> tout le monde en même temps. Finalement, moi je n'ai pas de calculatrice entre les mains. Ce sont les élèves qui font le calcul, un ou des élèves. Ensuite, <b>on trouve la réponse</b> puis on établit si c'est ce que l'on cherchait puis si ça correspond à la réalité, si le signe de la réponse est réaliste, bon des choses comme ça. Moments forts, je dirais que c'est vraiment d'aller <b>identifier la formule</b> puis d' <b>identifier dans la formule comment on va isoler la valeur qu'on cherche</b> . Bien, je dis ça, mais en fait moments forts c'est aussi d' <b>identifier les données dans l'énoncé du problème</b> . (Ent pré 1, ens 1)
<b>2. une démarche expérimentale</b>
P : Bien oui parce que le laboratoire qu'ils vont faire, mais surtout le traitement des données qu'ils vont faire ensuite des données recueillies en laboratoire ce n'est que ça, c'est de faire des additions de systèmes. Dans ce cas-ci, ça va être des systèmes de forces. Je ne vais pas insister sur la notion de force, mais j'insisterai sur la notion de comment on additionne des vecteurs alors le traitement des données du laboratoire, c'est de <b>faire trois fois des additions de systèmes de vecteurs, mais avec deux méthodes différentes</b> donc ce n'est que ça, appliquer le modèle, puis le pratiquer, le refaire, puis s'assurer qu'on la bonne démarche. (Ent pré 2, ens 1)
<b>3. une démarche d'analyse et de construction de graphiques et de formules mathématiques</b>
P : Donc on va faire directement sur l'écran <b>la relation entre la formule mathématique et ce que ça donne dans le graphique</b> . Ensuite, la même chose pour une autre équation où l'on va pouvoir aller faire <b>l'aire sous la courbe dans un graphique</b> . On va voir que ça peut nous donner la variation de la position pour un mobile. Donc, je vais vraiment le faire au tableau mathématiquement et graphiquement devant les élèves. (Ent pré 3, ens 1)

## 2. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1

Sur le plan des finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1, notre analyse des réponses issues des questions « Pourquoi est-il utile pour les élèves d'apprendre les modèles que tu viens de m'énumérer ? » et « Pourquoi est-il utile pour les élèves d'apprendre une démarche de modélisation ? » permet de dégager plusieurs finalités illustrées dans le **tableau 9**. Pour la première

finalité, les modèles et la démarche de modélisation sont utiles aux élèves, car ils leur permettent de manipuler, visualiser et comprendre des concepts et des phénomènes (N=6). Cette enseignante privilégie la compréhension des mouvements impliqués dans divers phénomènes de leur environnement immédiat. Et pour être en mesure de décrire adéquatement ces mouvements, les élèves doivent nécessairement comprendre et mobiliser les concepts de déplacement, de vitesse et d'accélération tant sur le plan conceptuel (en distinguant une vitesse moyenne d'une vitesse instantanée ou en interprétant le signe d'une vitesse ou d'une accélération dans un mouvement quelconque) que sur le plan symbolique (en représentant un mouvement quelconque par un graphique ou des systèmes vectoriels impliquant des déplacements, des vitesses et des accélérations). Pour cette même finalité, elle évoque la démarche expérimentale mise en œuvre dans le laboratoire *La souque à la corde scientifique* qui a permis aux élèves de manipuler, de visualiser et de comprendre concrètement ce qu'est un concept abstrait, celui de vecteur. Pour ce qui est de la deuxième finalité, les modèles et la démarche de modélisation sont utiles aux élèves, car ils leur permettent de développer des habiletés d'investigation scientifique ou de s'approprier la démarche ou la méthode scientifique (N=6). À ce sujet, elle fait plus particulièrement référence à l'habileté à analyser des représentations graphiques, laquelle s'avère non seulement essentielle en physique, mais aussi en sciences en général ou dans d'autres disciplines scolaires comme les mathématiques. En outre, elle fait part de sa grande préoccupation à amener les élèves à s'approprier la démarche ou la méthode scientifique à laquelle ils doivent recourir non seulement dans la présente séquence d'enseignement, mais en science en général. Ce faisant, elle les prépare à leur entrée dans l'enseignement supérieur (au Cégep). Quant à la troisième finalité, l'enseignante fait référence au potentiel de la démarche ou la méthode scientifique proposée dans les manuels scolaires et qu'elle a apprise elle-même à l'école pour l'utilisation d'outils mathématiques en vue de calculer des grandeurs physiques (N=1). La mise en relation des registres de représentation sémiotique constitue la quatrième finalité de la démarche de modélisation (N=1). C'est plus particulièrement la mise en relation entre les représentations algébriques (formules mathématiques) et les représentations graphiques qui est concernée. Enfin, la cinquième finalité de la démarche de modélisation rapportée par l'enseignante est la résolution de problèmes en sciences et dans la vie de tous les jours (N=2).



Tableau 9 : Finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique selon l'enseignante 1

<b>Il est utile que les élèves recourent aux modèles et à la démarche de modélisation en physique parce que cela leur permet de...</b>
<b>1. manipuler, visualiser et comprendre des concepts et des phénomènes (N=6)</b>
P : Si je pense au niveau vraiment concept puis pourquoi je le fais à ce moment-ci, c'est parce que je veux vraiment que la <b>notion de vecteur qu'ils voient vraiment, qu'ils puissent manipuler</b> , trouver par eux-mêmes une valeur vectorielle et comprendre pourquoi l'orientation est si importante. [...] On a un système super simple avec la table de forces puis ça va être, comment je dirais bien ça, presque instinctif pour eux de détecter quelle est la troisième force qui peut annuler les deux premières donc <b>je trouve qu'en le faisant, en le manipulant, puis en le visualisant</b> , ça va vraiment mettre un point, comment je pourrais bien dire ça, je trouve que ça tombe pile au bon moment de <b>pouvoir le visualiser, l'expérimenter</b> , puis de voir qu'effectivement que la force va être annulée dans le système de forces. Donc ma préoccupation au niveau du concept c'est vraiment amener un élément, comment dire, <b>manipulation au vrai sens du terme</b> , voir une force, l'effet d'une force, puis réussir à la combattre par une petite corde, mais voir que cette corde-là, elle a une grandeur et une orientation. Ça, c'est ma préoccupation. (Ent pré 2, ens 1)
<b>2. développer des habiletés d'investigation scientifique ou de s'approprier la démarche ou la méthode scientifique (N=3)</b>
P : Moi je <b>prépare des élèves qui vont potentiellement aller au Cégep en sciences donc je trouve ça important de leur inculquer ce qu'on appelle la méthode scientifique</b> puis qu'ils intègrent ça en eux. Donc à chaque fois qu'ils ont un travail à produire ou un rapport de laboratoire à faire ou une démarche à faire en sciences, bien pour eux ce serait déjà intégrer l'ordre logique de la séquence de la démarche scientifique. (Ent pré 4, ens 1)
<b>3. utiliser des outils mathématiques pour calculer des grandeurs physiques (N=1)</b>
P : Je dirais que c'est la méthode qui est proposée dans mon matériel, c'est la méthode qui était proposée dans le matériel avant, c'est la méthode qui était proposée dans les autres cahiers que j'ai déjà vus avant. C'est probablement la méthode par laquelle je l'ai appris aussi. Je ne m'en souviens pas, mais je pense que oui. Bien pour moi ça a beaucoup de sens parce <b>qu'on utilise des outils mathématiques</b> , puis on en arrive à des valeurs physiques. Donc dans ma tête c'est la meilleure façon de représenter ces formules-là. (Ent pré 3, ens 1)
<b>4. mettre en relation des registres de représentation sémiotique (N=1)</b>
P : Ensuite, d'associer des manipulations mathématiques de type formule que l'on peut retrouver justement dans un graphique, puis après ça on peut en faire une formule générale. Par exemple, dans un graphique où il y a une variation exponentielle en fonction du temps, on peut aller trouver des informations comme la pente de la tangente en un point. Bref, <b>on peut faire le lien entre les formules mathématiques et les représentations graphiques</b> . (Ent pré 3, ens 1)
<b>5. résoudre des problèmes (N=2)</b>
P : Bien cette démarche-là [la démarche de modélisation] dans ma tête <b>c'est la plus simple, la plus claire et la plus logique pour résoudre un problème</b> . Puis c'est une démarche qui s'applique à n'importe quel <b>problème de la vie de tous les jours</b> , mais encore plus dans le <b>domaine des sciences</b> identifier les valeurs connues, identifier les valeurs inconnues, puis trouver quelle formule s'appliquerait dans chacun des cas. Pour moi, c'est la façon la plus évidente de résoudre un problème. (Ent pré 4, ens 1)

### 3. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1

#### 3.1 La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle macroscopique

Sur le plan macroscopique, la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 s'étale sur 11 séances. Elle est structurée autour d'une dizaine de groupes de savoirs : la position, la distance parcourue, le déplacement, la vitesse (vitesse, vitesse instantanée et moyenne), la variation de la vitesse, l'accélération (accélération, accélération instantanée et moyenne), le mouvement, le mouvement rectiligne uniforme, le mouvement rectiligne uniformément accéléré et les vecteurs<sup>102</sup> (**figure 24**). Le nombre de facettes de savoir et la fréquence d'apparition totale des facettes (noté par N) pour les groupes qui relèvent du domaine de la cinématique indiquent que cette séquence d'enseignement met l'accent sur la vitesse (36 facettes ; N=127), l'accélération (29 facettes ; N=152), ainsi que sur les modèles du mouvement rectiligne uniforme (27 facettes, N=92) et du mouvement rectiligne uniformément accéléré (49 facettes ; N=112).

Nous situons dans cette séquence d'enseignement deux laboratoires : un premier laboratoire sur les vecteurs *La souque à la corde scientifique* mettant en jeu une démarche de modélisation dans le domaine de la dynamique et mobilisant uniquement des savoirs vectoriels, lequel est réalisé lors des séances 4, 5, 6 et 9 (**annexe 17, tableaux 4 à 9**). Ce laboratoire donne lieu à une absence de construction de facettes de savoir en cinématique ; un second laboratoire sur le plan incliné descendant sans propulsion initiale *Une descente en planche à neige* mettant en jeu une démarche de modélisation dans le domaine de la cinématique et ayant un fort potentiel pour la mobilisation de plusieurs savoirs comme ceux de position, de distance parcourue, de vitesse, de variation de la vitesse, d'accélération, de mouvement et de mouvement rectiligne uniformément accéléré, lequel est réalisé lors des séances 8 et 11 (**annexe 17, tableaux 8 et 11**). Ces deux laboratoires se caractérisent par une phase de problématisation qui se réduit à la présentation d'une mise en situation par l'enseignante et une absence de phase de planification du fait que les protocoles sont

---

<sup>102</sup> Notons que les vecteurs sont appréhendés soit du point de vue des mathématiques, soit du point de vue de la physique. Du point de vue de la physique, nous les avons intégrés dans les groupes déplacement, vitesse, variation de la vitesse et accélération.

entièrement donnés aux élèves<sup>103</sup>. La **figure 24** montre que le mouvement rectiligne uniforme est traité sans relation avec un des deux laboratoires. Par ailleurs, même si le second laboratoire présente un fort potentiel pour la construction des groupes de savoirs qui figurent dans l'encadré qui lui est associé, notre analyse à l'échelle microscopique met en évidence que ces derniers sont essentiellement introduits en marge de cette démarche de modélisation.

---

<sup>103</sup> Nous ferons une analyse plus détaillée de ces phases un peu plus loin.

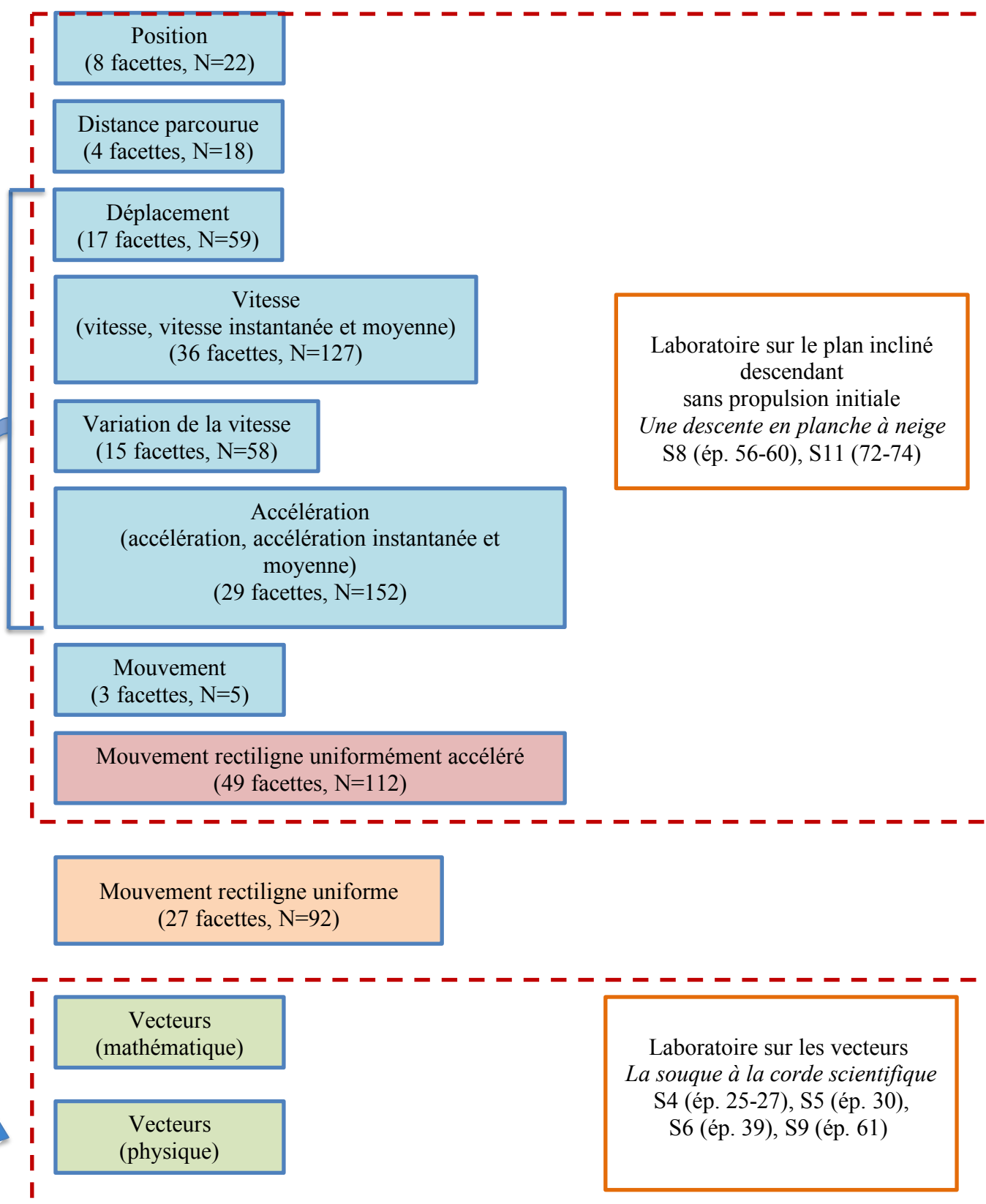


Figure 24- Réseau des savoirs en relation avec les laboratoires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

### 3.2 La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle mésoscopique

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons une analyse de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 en mettant en évidence la manière avec laquelle cette séquence est mise en œuvre du point de vue de cinq indicateurs d'ordre mésoscopique : les thèmes et sous-thèmes disciplinaires, les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les phases de la démarche de modélisation, les ressources didactiques utilisées et les modalités d'organisation de la classe.

#### 3.2.1 *Les thèmes et sous-thèmes disciplinaires*

La séquence d'enseignement de l'enseignante 1 est découpée en 5 thèmes disciplinaires<sup>104</sup> : les variables du mouvement (thème 1) ; les vecteurs (thème 2) ; le mouvement rectiligne uniforme (MRU) (thème 3) ; le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) (thème 4) ; le MRU ou le MRUA (thème 5). Les deux premiers thèmes sont subdivisés en sous-thèmes (**tableau 10**). Le thème 1, les variables du mouvement, est subdivisé en 7 sous-thèmes qui regroupent divers savoirs conceptuels du domaine de la cinématique : la distance parcourue, le déplacement, la vitesse, la variation de la vitesse et l'accélération. Quant au thème 2, celui des vecteurs, il est subdivisé en 2 sous-thèmes. Le premier sous-thème est l'aspect mathématique des vecteurs, dans lequel ceux-ci sont traités en lien avec des concepts et processus mathématiques. Il englobe les éléments qui caractérisent un vecteur (norme, direction et sens d'un vecteur) ou les méthodes algébrique et graphique d'addition vectorielle. Le second sous-thème est l'application des vecteurs en physique, dans lequel ceux-ci constituent des outils mathématiques pour traiter des phénomènes de la physique. Il comporte le schéma vectoriel représentant les forces qui agissent sur un mobile en mouvement sur un plan incliné descendant et un vecteur vitesse représentant l'évolution de la vitesse (sa grandeur et son orientation) d'un mobile en chute libre.<sup>105</sup>

---

<sup>104</sup> Le découpage des thèmes et sous-thèmes disciplinaires proposé est celui de l'enseignante 1.

<sup>105</sup> Les sous-thèmes *Aspect mathématique des vecteurs* et *Application des vecteurs en physique* font parfois l'objet d'un traitement simultané dans la séquence.

Tableau 10 : Thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Thèmes	Temps	Fréquence relative (%)
Gestion du travail (aucun thème)	1 h 45 min 13 s	12,2
Thème 1 : Variables du mouvement	2 h 56 min 48 s	<b>20,5</b>
1.1 Déplacement et distance parcourue	55 min 11 s	6,4
1.2 Vitesse	22 min 7 s	2,6
1.3 Variation de la vitesse	14 min 27 s	1,7
1.4 Vitesse et variation de la vitesse	15 min 50 s	1,8
1.5 Déplacement, distance parcourue et vitesse	14 min 32 s	1,7
1.6 Accélération	49 min 58 s	5,8
1.7 Vitesse et accélération	4 min 42 s	0,5
Thème 2 : Vecteurs (aspect mathématique ou application des vecteurs en physique)	4 h 51 min 26 s	<b>33,9</b>
Thème 3 : Mouvement rectiligne uniforme (MRU)	1 h 5 min 14 s	7,6
Thème 4 : Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)	2 h 21 min 13 s	16,4
Thème 5 : MRU ou MRUA	1 h 19 min 31 s	9,4
Total	14 h 1 min 48 s	100

Cette séquence d'enseignement dure environ 14 heures et s'étale sur 11 séances ([annexe 17, tableaux 1 à 11](#)). Le thème 2 traité au milieu de la séquence, dans les séances 3, 4, 5, 6 et 9, est de loin le thème qui occupe la proportion de temps la plus grande avec environ un tiers du temps. Les thèmes 1 et 4 traités respectivement au début (séances 1 et 2) et à la fin (séances 5, 7, 8, 10 et 11) de la séquence représentent une proportion similaire du temps, soit environ 20 % du temps. Quant aux thèmes 3 et 5, ils représentent moins de 10 % du temps de la séquence. Enfin, la gestion du travail (aucun thème) occupe une proportion non négligeable de temps (1 h 45) dans l'enseignement de cette séquence. Celle-ci se fait souvent au début et à la fin de chacune des séances et consiste essentiellement en la présentation de déroulement de la séance, l'explication des tâches à réaliser ou des modalités d'évaluation des apprentissages.

### 3.2.2 Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires

Le [tableau 11](#) présente les contextes de traitement des thèmes disciplinaires de cette séquence d'enseignement et montre que les thèmes disciplinaires sont essentiellement traités à travers la théorie (40,7 % du temps) et l'exercisation (31,2 % du temps), ce dernier contexte se déclinant en des proportions à peu près égales en la réalisation d'exercices (14 % du temps) et en

la correction d'exercices (17,2 % du temps). Ce sont de loin les laboratoires qui occupent la proportion de temps la plus petite de la séquence avec 15,1 % du temps qui se répartit en des moments d'explication préalables aux laboratoires (5,1 % du temps), en des moments de réalisation (8,5 % du temps) et de correction des laboratoires (1,5 % du temps). Autrement dit, cette séquence offre peu d'occasions aux élèves de s'engager intellectuellement dans le recueil et l'analyse de données empiriques.

Tableau 11 : Contextes de traitement des thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus)

Contextes de traitement des thèmes disciplinaires	Temps	Fréquence relative (%)
1. Gestion du travail (aucun thème)	1 h 45 min 13 s	12,8
2. Théorie	5 h 31 min 25 s	<b>40,7</b>
3. Exercices	4 h 14 min 40 s	<b>31,2</b>
a) Réalisation d'exercices	1 h 54 min 54 s	14
b) Correction d'exercices	2 h 19 min 46 s	17,2
4. Laboratoires	2 h 3 min 30 s	15,1
a) Explications du laboratoire	41 min 53 s	5,1
b) Réalisation du laboratoire	1 h 9 min 11 s	8,5
c) Correction du laboratoire	12 min 26 s	1,5
Total	14 h 1 min 48 s	100

### 3.2.3 Les phases de la démarche de modélisation

Le **tableau 12** présente les phases de la démarche de modélisation en lien avec les deux laboratoires de la séquence<sup>106</sup>. Il montre que dans 18 % du temps de cette séquence les élèves sont engagés dans l'une ou l'autre des phases de la démarche de modélisation, hormis la phase *Planifier*. Par conséquent, 82 % du temps de la séquence se réalise en marge d'une démarche de modélisation quelconque. La phase *Investiguer* est la phase qui prend la proportion de temps la plus élevée avec 10,8 % du temps.

<sup>106</sup> Les étapes de la démarche de modélisation ont été repérées en lien avec les moments de laboratoire.

Tableau 12 : Laboratoires et épisodes couverts en lien avec la démarche de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Phases de la démarche de modélisation	Laboratoires et épisodes couverts	Temps	Fréquence relative (%)	Total
Problématiser	La souque à la corde scientifique (ép. 25)	12 min 2 s	1,4	3,4
	Une descente en planche à neige (ép. 56)	16 min 31 s	2	
Planifier	La souque à la corde scientifique (---)	0	0	0
	Une descente en planche à neige (---)	0	0	
Investiguer	La souque à la corde scientifique (ép. 27, 30, et 39)	56 min 31 s	6,8	10,8
	Une descente en planche à neige (ép. 57, 58, 59 et 60)	34 min 9 s	4	
Conceptualiser et déployer	La souque à la corde scientifique (ép. 61)	24 min 24 s	3	3,8
	Une descente en planche à neige (ép. 72 et 74)	7 min 59 s	0,8	
Hors démarche	Autres épisodes	11 h 50 min	82	82
Total		14 h 1 min 48 s	100	100

### 3.2.4 Les ressources didactiques utilisées

Sur le plan des ressources didactiques, six sont utilisées par l'enseignante ou les élèves lors de la mise en œuvre de cette séquence : les notes de cours ; le cahier d'apprentissage qui est un matériel imprimé faisant à la fois office de manuel de l'élève (en fournissant des références théoriques) et de cahier d'exercices (en fournissant des exercices en lien avec les thématiques proposées) ; les feuilles d'exercices utilisées comme compléments aux exercices proposés dans le cahier d'apprentissage ; le document de laboratoire (celui qui explique le déroulement d'un laboratoire : voir les [annexes 8 et 9](#)) ; le matériel de laboratoire ; le rapport de laboratoire (celui rédigé par les élèves au terme d'un laboratoire (le rapport de laboratoire *Une descente en planche à neige* et le rapport de laboratoire *La souque à la corde scientifique*). Selon les moments de la séquence, ces ressources peuvent faire l'objet d'une utilisation exclusive par l'enseignante (P) ou les élèves (E) ou d'une utilisation conjointe par ces deux acteurs (P et E).



Le **tableau 13** présente les ressources didactiques utilisées par l'enseignante 1 dans la séquence d'enseignement (tous thèmes confondus). Il montre que le cahier d'apprentissage est de loin la ressource didactique la plus utilisée (47,7 % du temps), et ce, plus particulièrement de manière conjointe par l'enseignante et les élèves (37 % du temps). Quant au **tableau 14**, il spécifie les modalités d'utilisation des ressources didactiques selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires. Il permet de constater que, dans son utilisation conjointe, le cahier d'apprentissage est fortement utilisé dans les moments de présentation des notions théoriques (17,3 % du temps) et aussi dans les moments de réalisation (7,4 % du temps) et de correction des exercices en plénière (13,2 % du temps). L'utilisation exclusive du cahier d'apprentissage par les élèves se fait dans une moindre proportion du temps (10,7 % du temps) et essentiellement dans les moments de réalisation d'exercices (6,5 % du temps). Au deuxième rang des ressources didactiques les plus utilisées figurent les notes de cours qui représentent 16,3 % du temps de la séquence. Ces notes sont réalisées conjointement par l'enseignante et les élèves en vue de faire la synthèse des notions théoriques abordées aux cours précédents avec le cahier d'apprentissage<sup>107</sup>. Au troisième rang des ressources didactiques les plus utilisées figurent les ressources en lien avec la réalisation des laboratoires, c'est-à-dire les documents de laboratoire (17,3 % du temps), le matériel de laboratoire (17,7 %) et les rapports de laboratoire (4,1 % du temps). Si la proportion du temps réservée à l'utilisation exclusive des documents de laboratoire par les élèves (9,3 % du temps de la séquence) est environ la même que celle liée à son utilisation conjointe enseignant-élèves (8 % du temps), il n'en est pas ainsi du matériel de laboratoire. En effet, celui-ci est deux fois plus souvent utilisé par l'enseignante (11,8 % du temps) au cours de la séquence. Plus particulièrement, il est utilisé dans la présentation des notions théoriques (8,5 % du temps) dans le cadre de diverses démonstrations expérimentales. Quant aux feuilles d'exercices, même si elles sont moins utilisées que les autres ressources, elles font également l'objet d'une utilisation conjointe enseignant-élèves la plupart du temps (5,8 % du temps), notamment dans les moments de réalisation des exercices en plénière (3,9 % du temps de la séquence) ou dans la diffusion de la théorie (1,8 % du temps).

---

<sup>107</sup> Nous expliciterons plus loin sur la manière avec laquelle l'enseignante utilise les notes de cours.

Tableau 13 : Ressources didactiques utilisées dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1  
(tous thèmes confondus)

Ressources didactiques	Temps	Fréquence relative (%)
Aucune	56 min 33 s	6,9
Notes de cours (P et E)	2 h 12 min 38 s	<b>16,3</b>
Cahier d'apprentissage (E)	1 h 26 min 57 s	<b>10,7</b>
Cahier d'apprentissage (P et E)	5 h 1 min 6 s	<b>37</b>
Feuille d'exercices (E)	5 min 13 s	0,6
Feuille d'exercices (P et E)	47 min 16 s	5,8
Document de laboratoire (E)	1 h 16 min 11 s	9,3
Document de laboratoire (P et E)	1 h 5 min 3 s	8
Matériel de laboratoire (E)	48 min 21 s	5,9
Matériel de laboratoire (P)	1 h 36 min 13 s	11,8
Rapport de laboratoire (P)	7 min 44 s	0,9
Rapport de laboratoire (P et E)	25 min 55 s	3,2

Tableau 14 : Ressources didactiques utilisées selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Contextes	Ressources didactiques utilisées	Temps	Fréquence relative (%)
Gestion du travail	Aucune	56 min 33 s	6,9
	Document de laboratoire (P et E)	31 min 59 s	3,9
	Rapport de laboratoire (P et E)	16 min 41 s	2
Théorie	Notes de cours (P et E)	2 h 12 min 38 s	<b>16,3</b>
	Cahier d'apprentissage (P et E)	2 h 20 min 44 s	<b>17,3</b>
	Cahier d'apprentissage (E)	31 min 43 s	3,9
	Matériel de laboratoire (P)	1 h 9 min 1 s	8,5
	Feuille d'exercices (P et E)	14 min 54 s	1,8
Exercices : réalisation	Cahier d'apprentissage (E)	53 min 13 s	6,5
	Cahier d'apprentissage (P et E)	1 h 0 min 7 s	7,4
	Matériel de laboratoire (P)	5 min 55 s	0,7
	Feuille d'exercices (E)	5 min 13 s	0,6
Exercices : correction	Cahier d'apprentissage (P et E)	1 h 47 min 25 s	<b>13,2</b>
	Matériel de laboratoire (P)	1 min 7 s	0,1
	Feuille d'exercices (P et E)	32 min 22 s	3,9
Laboratoire : explications	Document de laboratoire (E)	7 min	0,8
	Document de laboratoire (P et E)	20 min 38 s	2,5
	Matériel de laboratoire (P)	20 min 10 s	2,5
	Rapport de laboratoire (P et E)	9 min 14 s	1,1
Laboratoire : réalisation	Document de laboratoire (E)	1 h 9 min 11 s	8,5
	Matériel de laboratoire (E)	48 min 21 s	5,9
Laboratoire : correction	Document de laboratoire (P et E)	12 min 26 s	1,5
	Rapport de laboratoire (P)	7 min 44 s	0,9

### 3.2.5 Les modalités d'organisation de la classe

Les **tableaux 15 et 16** témoignent des modalités d'organisation de la classe de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1. Il permet de constater que cette séquence se déroule dans une très grande proportion du temps en grand groupe (GG) (77,5 % du temps). La modalité GG domine particulièrement dans deux contextes de traitement des thèmes disciplinaires : dans la théorie (38 % du temps) et les exercices (25,8 % du temps). Le travail en équipe (EQ) qui représente 14,6 % du temps de la séquence et se fait essentiellement lors de la réalisation des laboratoires (8,5 % du temps de la séquence) et des exercices (3,3 % du temps de la séquence). Quant au travail individuel (IND) dont la proportion du temps qui lui est réservé est la plus petite (7,9 % du temps de la séquence), il se fait essentiellement lors de la réalisation des exercices.

Tableau 15 : Modalités d'organisation de la classe dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus)

MOC	Temps	Fréquence relative (%)
<b>En grand groupe</b>	10 h 52 min 18 s	<b>77,5</b>
En équipes	2 h 3 min 10 s	14,6
Individuellement	1 h 6 min 20 s	7,9
Total	14 h 1 min 48 s	100

Tableau 16 : Modalités d'organisation de la classe selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 (tous thèmes confondus)

Contextes de traitement des thèmes disciplinaires	En grand groupe Temps et fréquence relative (%)	En équipes Temps et fréquence relative (%)	Individuellement Temps et fréquence relative (%)
Gestion du travail	1 h 25 min 9 s	16 min 41 s	0
	10,5	2	0
Théorie	5 h 9 min 39 s	0	27 min 47 s
	38	0	2,7
Exercices : réalisation	1 h 10 min 25 s	27 min 11 s	37 min 54 s
	8,6	3,3	4,7
Exercices : correction	2 h 19 min 46 s	0	6 min 59 s
	17,2	0	0,9
Laboratoire : explications	34 min 53 s	7 min	0
	4,3	0,9	0
Laboratoire : réalisation	0	1 h 9 min 11 s	0
	0	8,5	0
Laboratoire : correction	12 min 26 s	0	0
	1,5	0	0
Total (temps)	10 h 52 min 18 s	2 h 3 min 10 s	1 h 6 min 20 s
Total (fréquence relative)	77,5	14,6	7,9

### 3.2.6 Les synopsis des séances de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans cette sous-section, nous donnons un aperçu du déroulement des séances de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1. De manière à réduire au maximum l'espace de description, cet aperçu est donné au moyen de synopsis simplifiés : dans une première partie (zone grisée), des indications globales sur les cinq indicateurs d'ordre mésoscopique précédemment présentés sont apportées, et dans une seconde partie (zone non grisée), une description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage est proposée (**tableaux 17 à 27**). Dans la partie grisée, nous avons mis en évidence, par un astérisque, les moments où il y a mise en œuvre d'une démarche de modélisation au sein d'un laboratoire. Néanmoins, le lecteur trouve à l'**annexe 17** des synopsis détaillés fournissant des indications précises sur le découpage temporel des 75 épisodes des onze séances selon chacune des variables mésoscopiques retenues. Ces descriptions synoptiques, présentées dans leur forme simplifiée ou détaillée, ont pour objectif de contextualiser et de donner sens aux résultats à l'échelle microscopique (en matière de tâches épistémiques et de facettes de savoir) présentés dans les prochaines sections.

Tableau 17 : Synopsis simplifié de la séance 1 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 1</b> : épisodes 1 à 8</p> <p><b>Intentions explicites</b> : s'approprier le vocabulaire associé aux concepts de cinématique et modéliser des phénomènes physiques</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel, distance parcourue, déplacement, variation de la position, vitesse, vitesse moyenne et instantanée (scalaire et vectorielle) et variation de la vitesse</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : théorie et exercisation (réalisation et correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : CA (P&amp;E), CA (E) et ML (P)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : EQ et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Introduction des variables pour analyser le mouvement d'objets matériels : distance parcourue, variation de la position (déplacement), vitesse, vitesse moyenne et instantanée (scalaire et vectorielle) et variation de la vitesse</li> <li>-Résolution collective de divers problèmes d'application sur la distance parcourue et le déplacement de mobiles</li> <li>-Contextualisation de la vitesse dans la vie quotidienne, en chimie (vitesse d'une réaction chimique et en physique optique (vitesse des ondes sonores et lumineuses))</li> <li>-Interprétation des signes du déplacement et de la variation de la vitesse d'objets en mouvement sur les axes vertical et horizontal d'un plan cartésien</li> <li>-Détermination du signe du déplacement et de variation de la vitesse d'une voiture qui se déplace sur l'axe horizontal</li> <li>-Démonstration expérimentale par l'enseignante pour déterminer les signes du déplacement et de la variation de la vitesse d'une balle en mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale et d'une balle en chute libre</li> <li>-Résolution en équipes et correction collective de problèmes d'application sur la vitesse et de variation de la vitesse</li> </ul>

Tableau 18 : Synopsis simplifié de la séance 2 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 2</b> : épisodes 9 à 15</p> <p><b>Intentions explicites</b> : s'approprier le vocabulaire associé aux concepts de cinématique et modéliser des phénomènes physiques</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel, distance parcourue, variation de la position (déplacement), vitesse, accélération (scalaire et vectorielle) et vecteurs (M)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : théorie et exercisation (réalisation et correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : CA (P&amp;E) et ML (P)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Résolution et correction collectives de problèmes d'application sur la vitesse et de variation de la vitesse</li> <li>-Exemplification de la vitesse vectorielle dans différents contextes</li> <li>-Définition de l'accélération (scalaire et vectorielle) et de la formule de l'accélération, et construction de la signification de l'accélération positive et de l'accélération négative en s'appuyant sur la variation de la vitesse</li> <li>-Distinction entre l'accélération instantanée et l'accélération moyenne en contexte</li> <li>-Résolution et correction collectives de problèmes d'application sur l'accélération (instantanée et moyenne)</li> <li>-Démonstration expérimentale par l'enseignante pour déterminer l'accélération moyenne d'un objet sur un plan incliné</li> <li>-Démonstrations expérimentales par l'enseignante pour construire la signification des accélérations positive et négative et à l'échelle verticale (lancer d'une balle de golf dans les airs) et horizontale (déplacement d'un charriot de laboratoire)</li> <li>-Analyse collective de situations fictives visant à déterminer les signes du déplacement, de la variation de la vitesse et de l'accélération de deux mobiles en mouvement</li> <li>-Définition du concept de vecteur et caractérisation du déplacement, de la vitesse et de l'accélération en tant que grandeurs vectorielles</li> <li>-Présentation du plan cartésien comme référentiel pour décrire l'orientation d'un vecteur</li> </ul>

Tableau 19 : Synopsis simplifié de la séance 3 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 3</b> : épisodes 16 à 24</p> <p><b>Intentions explicites</b> : s'approprier le vocabulaire associé aux concepts de cinématique et aux vecteurs, et mathématiser des phénomènes physiques</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel, distance parcourue, variation de la position (déplacement), vitesse, vitesse moyenne et instantanée (scalaire et vectorielle), variation de la vitesse, accélération et vecteurs (méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle, vecteur résultant)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : théorie et exercisation (réalisation et correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : CA (P&amp;E) et FE (P&amp;E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : IND et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Correction collective de problèmes d'application sur la vitesse et l'accélération</li> <li>-Distinction entre une valeur vectorielle et une valeur scalaire</li> <li>-Caractérisation du déplacement, de la vitesse, de l'accélération et de la force en tant que grandeurs vectorielles et expression de leur symbolisme</li> <li>-Représentation de vecteurs à l'aide de trois référentiels (points cardinaux, plan cartésien mixte) et analyse des apports et limites de ces référentiels</li> <li>-Explication d'une procédure pour composer un vecteur (recherche de sa norme et de son orientation à partir de ses composantes verticale et horizontale) et des méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle</li> <li>-Exemplification de situations fictives impliquant le recours aux méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle pour déterminer un vecteur résultant</li> <li>-Définition du vecteur résultant</li> <li>-Analyse des apports et limites de méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle</li> <li>-Résolution et correction individuelle et collective de problèmes d'application sur les vecteurs</li> </ul>

Tableau 20 : Synopsis simplifié de la séance 4 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 4</b> : épisodes 24 à 28</p> <p><b>Intentions explicites</b> : consolider la notion de vecteur en les exploitant comme outils mathématiques pour modéliser des phénomènes physiques</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel et vecteurs (méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle, vecteur équilibrant, vecteur opposé, vecteur résultant)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes, sauf pour les épisodes 25 et 27 (phase problématiser et investiguer)*</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : laboratoire sur les vecteurs <i>La souque à la corde scientifique</i> (explications et réalisation) (<a href="#">annexe 9</a>)*</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : DL (P&amp;E), DL (E), ML (P) et ML (E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : EQ et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Rappel de la notion de vecteur et des méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle comme outils mathématiques essentiels à la modélisation des phénomènes physiques</li> <li>-Énonciation de la mise en situation du laboratoire sur les vecteurs <i>La souque à la corde scientifique</i></li> <li>-Présentation du système modélisant les actions de personnes qui tirent sur un anneau central par des forces exercées sur un anneau un centre d'une table de forces</li> <li>-Description d'éléments du champ empirique à prendre en compte dans la réalisation du laboratoire : schéma de montage, matériel de laboratoire à utiliser (anneau, tige, table de force, etc.), but, variables, hypothèses, limites de l'expérience, sources d'erreurs, etc.</li> <li>-Explication d'une procédure expérimentale pour mesurer des deux vecteurs forces fixés sur une table de force</li> <li>-Réalisation du laboratoire par les élèves : rechercher des vecteurs équilibrants expérimentaux dans trois systèmes de forces dont deux vecteurs sont fixés</li> <li>-Présentation des exigences liées à la rédaction du laboratoire et du barème de correction du rapport de laboratoire</li> </ul>

Tableau 21 : Synopsis simplifié de la séance 5 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 5</b> : épisodes 29 à 37</p> <p><b>Intentions explicites</b> : consolider la notion de vecteur en les exploitant comme outils mathématiques pour modéliser des phénomènes physiques, analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques et de formules.</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel, vecteurs (méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle, vecteur équilibrant, vecteur opposé, vecteur résultant), mouvement rectiligne uniforme (MRU) et mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes, sauf pour l'épisode 30 (phase investiguer)*</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : laboratoire sur les vecteurs <i>La souque à la corde scientifique</i> (explications) (<a href="#">annexe 9</a>)*, théorie et exercisation (correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : NC (P&amp;E) et FE (P&amp;E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Rappel des exigences relatives à la rédaction du rapport de laboratoire</li> <li>-Explication de la méthode graphique d'addition vectorielle dans le contexte du laboratoire <i>La souque à la corde scientifique</i></li> <li>-Prise de notes théoriques du mouvement rectiligne uniforme (MRU) et du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) et en vue de l'analyse du mouvement de mobiles à l'aide de graphiques et de formules mathématiques</li> <li>-Prise de notes théoriques sur les vecteurs</li> <li>-Correction collective de problèmes d'application sur les vecteurs</li> </ul>

Tableau 22 : Synopsis simplifié de la séance 6 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 6</b> : épisodes 38 à 47</p> <p><b>Intentions explicites</b> : consolider la notion de vecteur en les exploitant comme outils mathématiques pour modéliser des phénomènes physiques</p> <p><b>Thèmes</b> : référentiel, vecteurs (méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle, vecteur équilibrant, vecteur opposé, vecteur résultant)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes, sauf pour l'épisode 39 (phase investiguer)*</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : laboratoire sur les vecteurs <i>La souque à la corde scientifique</i> (explications) (<b>annexe 9</b>)* et exercisation (réalisation et correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : CA (P&amp;E), CA (E) et FE (P&amp;E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : IND et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Retour collectif sur les investigations réalisées par les élèves dans le laboratoire <i>La souque à la corde scientifique</i></li> <li>-Explication des exigences attendues pour la rédaction du rapport de laboratoire</li> <li>-Lecture individuelle dans le cahier d'apprentissage de notions théoriques sur l'utilisation des vecteurs pour représenter des déplacements, des vitesses et des accélérations dans des situations matérielles</li> <li>-Réalisation individuelle et correction et collective de problèmes d'application sur les vecteurs</li> </ul>

Tableau 23 : Synopsis simplifié de la séance 7 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 7</b> : épisodes 48 à 55</p> <p><b>Intentions explicites</b> : analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques et de formules</p> <p><b>Thèmes</b> : mouvement rectiligne uniforme (MRU) et mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : théorie et exercisation (réalisation et correction)</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : CA (E), CA (P&amp;E) et ML (P)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : IND et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Définition du mouvement rectiligne uniforme (MRU) en s'appuyant sur le cahier d'apprentissage et du matériel de laboratoire</li> <li>-Réalisation individuelle et correction collective de problèmes d'application sur le MRU</li> <li>-Définition du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) en s'appuyant sur le cahier d'apprentissage et du matériel de laboratoire</li> <li>-Réalisation individuelle et correction collective de problèmes d'application sur le MRUA</li> </ul>

Tableau 24 : Synopsis simplifié de la séance 8 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 8</b> : épisodes 56 à 60</p> <p><b>Intentions explicites</b> : analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques (de position, de vitesse et d'accélération) et de formules en contexte expérimental</p> <p><b>Thèmes</b> : mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : démarche de modélisation pour tous les épisodes (phases problématiser et investiguer)*</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : laboratoire sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale <i>Une descente en planche à neige</i> (<b>annexe 8</b>) (explications et réalisation)*</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : DL (E), DL (P&amp;E), ML (P) et ML (P&amp;E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : EQ et GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Lecture par les élèves de la mise en situation du laboratoire sur le MRUA : <i>Une descente en planche à neige</i></li> </ul>

- Explication des modalités de réalisation du laboratoire : procédure pour recueillir des données sur le mouvement du charriot de laboratoire
- Description des différentes parties du document du laboratoire : but, variables, hypothèses, manipulations, etc.) et des manipulations à faire
- Réalisation du laboratoire par les élèves : recueil de données position-temps d'un charriot en mouvement sur un plan incliné descendant ; construction, description et interprétation de graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps ; calcul de la vitesse moyenne et de l'accélération moyenne du charriot ; description du type de mouvement en jeu et de l'effet de l'angle d'inclinaison du plan incliné sur le mouvement d'un charriot
- Validation collective des données recueillies dans le laboratoire
- Explication des modalités pour la construire le rapport de laboratoire
- Réalisation du rapport de laboratoire en équipe de deux : mesurage sur un ruban marqueur de l'évolution de la position du charriot de laboratoire en fonction du temps aux intervalles de temps de 0,05 s ; représentation tabulaire des données position-temps du charriot ; construction du graphique position-temps

Tableau 25 : Synopsis simplifié de la séance 9 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

**Séance 9** : épisodes 61 et 62

**Intentions explicites** : consolider la notion de vecteur en les exploitant comme outils mathématiques pour modéliser des phénomènes physiques, analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques (de position, de vitesse et d'accélération) et de formules en contexte expérimental

**Thèmes** : référentiel, vecteurs (méthodes graphique et algébrique d'addition vectorielle, vecteur équilibrant, vecteur opposé, vecteur résultant), mouvement rectiligne uniforme (MRU) et mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)

**Phases de la démarche de modélisation** : démarche de modélisation pour l'épisode 61 (phase conceptualiser et déployer)\*

**Contextes de traitement des thèmes disciplinaires** : laboratoire sur les vecteurs *La souque à la corde scientifique* (correction) ([annexe 9](#))\* et exercices (correction)

**Ressources didactiques** : RL (P), RL (P&E) et CA (P&E)

**Modalités d'organisation de la classe** : EQ et GG

**Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage**

- Correction collective du rapport de laboratoire *La souque à la corde scientifique*
- Correction collective de problèmes d'application fictifs sur le MRU et MRUA

Tableau 26 : Synopsis simplifié de la séance 10 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

**Séance 10** : épisodes 63 à 66

**Intentions explicites** : analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques (de position, de vitesse et d'accélération) et de formules

**Thèmes** : mouvement rectiligne uniforme (MRU) et mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)

**Phases de la démarche de modélisation** : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes

**Contextes de traitement des thèmes disciplinaires** : exercices (réalisation et correction) et théorie

**Ressources didactiques** : CA (E), CA (P&E) + ML (P)

**Modalités d'organisation de la classe** : IND, EQ et GG

**Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage**

- Correction collective de problèmes d'application fictifs sur le MRUA
- Théorie sur le MRU et le MRUA : analyse du mouvement de mobiles en MRU et en MRUA en recourant à leurs graphiques associés (position-temps, vitesse-temps et accélération-temps) simulés par une animation vidéo ; interprétation d'un mouvement accéléré d'une voiture en MRUA ; déduction de la formule de la vitesse du taux de variation d'un graphique position-temps ; représentation de l'accélération d'une voiture en MRU dans le sens de référence, représentation de la vitesse ou de l'accélération d'une voiture en MRUA dans le sens (ou le sens contraire) de référence ; généralisation d'équations du mouvement d'un objet en chute libre au MRUA, etc.
- Résolution en équipes de problèmes d'application sur le MRUA



Tableau 27 : Synopsis simplifié de la séance 11 de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

<p><b>Séance 11</b> : épisodes 67 à 75</p> <p><b>Intentions explicites</b> : analyser le mouvement de mobiles en mouvement rectiligne uniforme (MRU) et en mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) à l'aide de graphiques (de position, de vitesse et d'accélération) et de formules</p> <p><b>Thèmes</b> : mouvement rectiligne uniforme (MRU) et mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)</p> <p><b>Phases de la démarche de modélisation</b> : hors démarche de modélisation pour tous les épisodes, sauf pour les épisodes 72 et 74 (phase conceptualiser et déployer)*</p> <p><b>Contextes de traitement des thèmes disciplinaires</b> : Laboratoire sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale (explication)* et exercisation (correction) et théorie</p> <p><b>Ressources didactiques</b> : NC (P&amp;E), ML (P), RL (P &amp; E)</p> <p><b>Modalités d'organisation de la classe</b> : GG</p>
<p><b>Description sommaire des activités d'enseignement et d'apprentissage</b></p> <p>-Notes de cours sur l'analyse du mouvement de mobiles en MRU et MRUA à l'aide de graphiques (position, vitesse et accélération) et de formules mathématiques : prédiction représentation et description des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU et en MRUA ; définition et déduction de formules du MRUA ; comparaison du temps de chute au sol d'une balle sur des plans dont les angles d'inclinaison sont distincts ; description de l'effet de la gravité sur un plan incliné à <math>90^\circ</math> ; évaluation de procédures pour représenter la courbe de régression des données expérimentales position-temps d'un mobile qui descend un plan incliné sans propulsion initiale ; interprétation d'un graphique accélération-temps d'un mobile qui descend un plan incliné sans propulsion initiale</p> <p>-Retour collectif sur le laboratoire sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale <i>Une descente en planche à neige</i></p> <p>-Correction collective de problèmes d'application sur le MRUA</p>

### 3.3 La pratique d'enseignement de l'enseignante 1 à l'échelle microscopique

#### 3.3.1 Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des tâches épistémiques

Nos analyses sous l'angle des tâches épistémiques sur la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 ont permis de dégager 21 tâches épistémiques avec une fréquence d'apparition totale de 2909 tâches pour une durée de 12 h 6 min 28 s. Les six tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées quant à leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus) dans cette séquence d'enseignement sont, dans l'ordre décroissant, les tâches ÉVALUER (N=544), EXPLIQUER (N=371), DÉCRIRE (N=359), ÉNONCER (N=274), INTERPRÉTER (N=228) et DÉFINIR (N=221). Dans une moindre proportion, nous recensons les tâches épistémiques FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (N=142), REPRÉSENTER (N=131), ARGUMENTER (N=123), EXEMPLIFIER (N=104) et COMPARER (N=102) (**figure 25**).

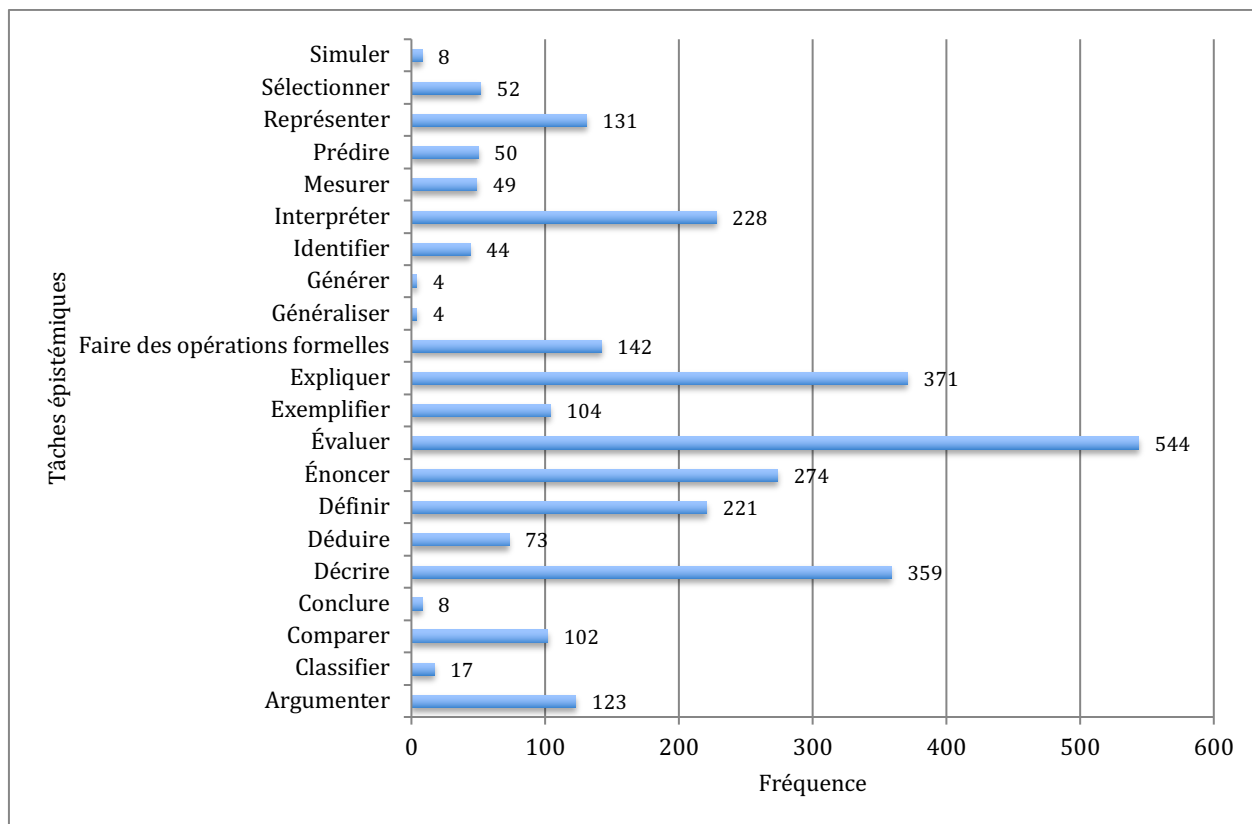


Figure 25- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Cependant, si nous considérons la durée totale de ces tâches épistémiques, l'ordre diffère. Ce sont de loin les tâches épistémiques DÉFINIR (DT=180,2 min), EXPLIQUER (DT=110,2 min), DÉCRIRE (DT=77,1 min), ÉVALUER (DT=53,7 min) et FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DT=50,3 min) qui occupent la part de temps la plus importante dans la séquence d'enseignement. Sur le plan de la durée, les tâches épistémiques ÉNONCER (DT=37,9 min) et INTERPRÉTER (DT=37,8 min) occupent une part de temps moins importante que les précédentes (**figure 26**). Cela s'explique par le fait que la durée moyenne des tâches épistémiques varie considérablement selon la nature de la tâche. La **figure 27** montre que si la durée moyenne d'une tâche épistémique est d'environ 15 secondes, les durées moyennes des tâches épistémiques DÉFINIR (DM=52 s), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DM=21 s) et EXPLIQUER (DM=18 s) sont nettement supérieures à celles des tâches épistémiques DÉCRIRE (DM=13 s), ÉNONCER (DM=8 s) et ÉVALUER (DM=6 s).

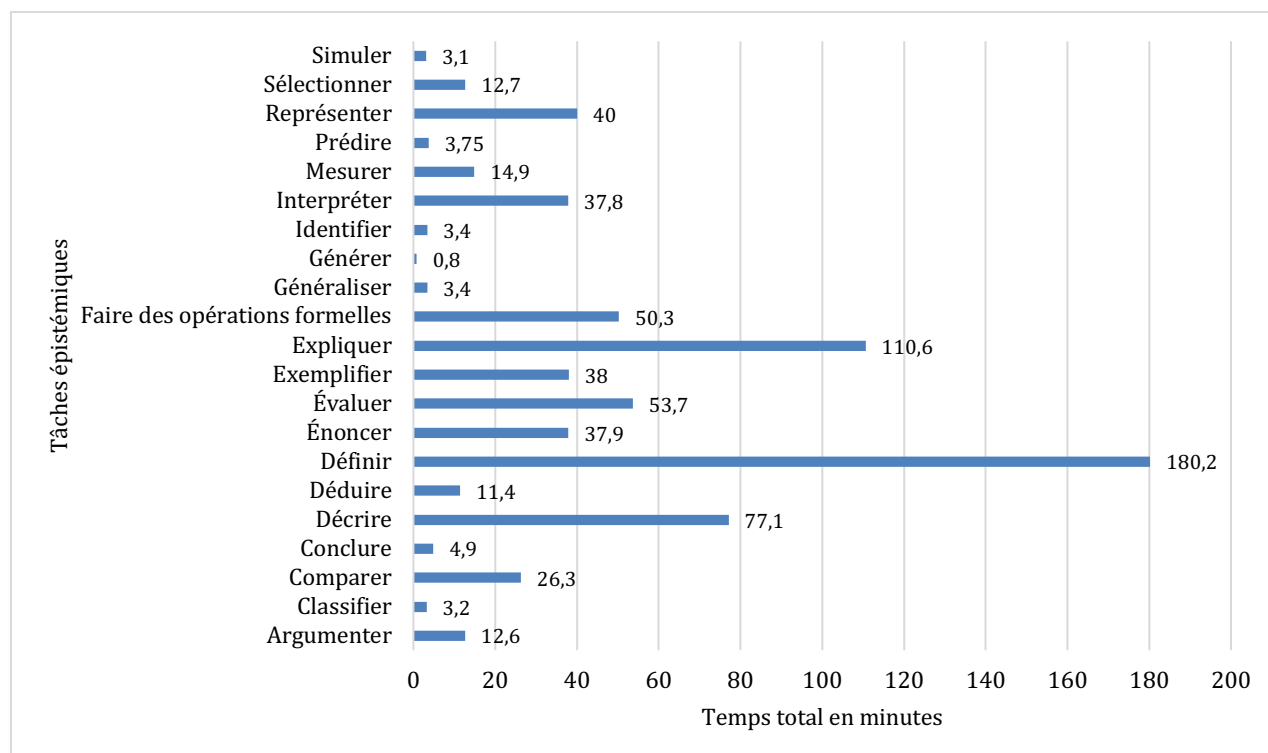


Figure 26- Durée totale (en minutes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

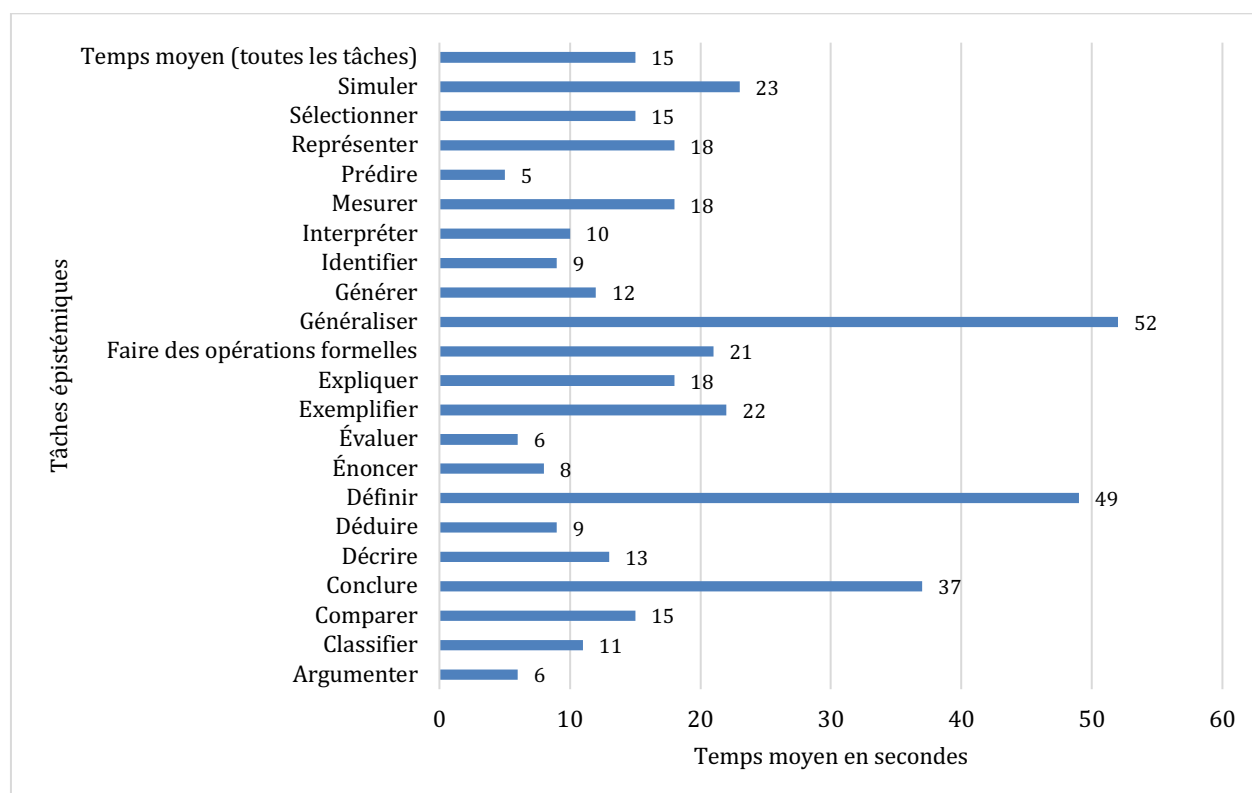


Figure 27- Durée moyenne (en secondes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Sur le plan thématique, si le nombre de tâches épistémiques est plus élevé dans les thèmes 1 (N=549), 2 (N=864) et 4 (N=762) (**figure 28**), la densité thématique (le nombre de tâches épistémiques par minute) est toutefois plus élevée dans les thèmes 3 (DTh=5,4), 4 (DTh =5,3) et 5 (DTh=4,8) que dans les deux premiers thèmes (**tableau 28**). Autrement dit, ce sont les thèmes disciplinaires qui touchent directement les modèles du MRU et du MRUA qui sont les plus denses sur le plan de tâches épistémiques. Par ailleurs, comme le montre la **figure 29**, les tâches épistémiques sont pour la plupart présentes dans l'ensemble des thèmes disciplinaires.

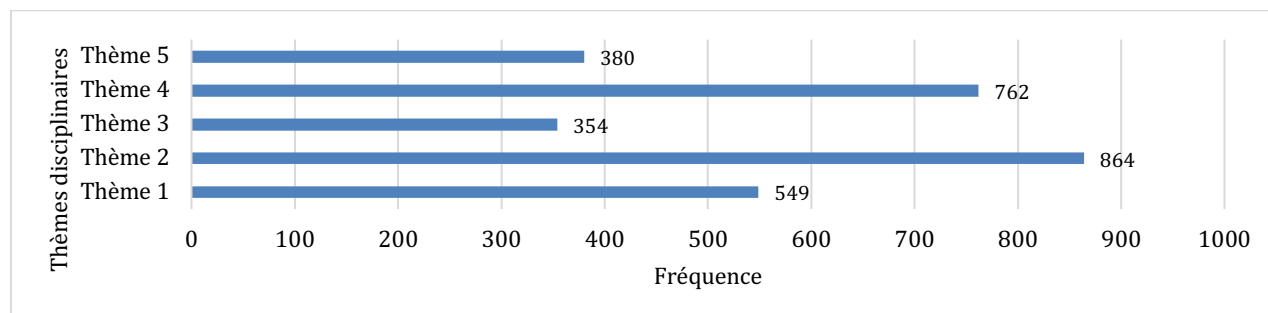


Figure 28- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Tableau 28 : Densité des tâches épistémiques (nombre de tâches épistémiques par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Thème 1- Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	Thème 3 MRU	Thème 4 MRUA	Thème 5 MRU et MRUA
3,1	3,0	5,4	6,3	4,8

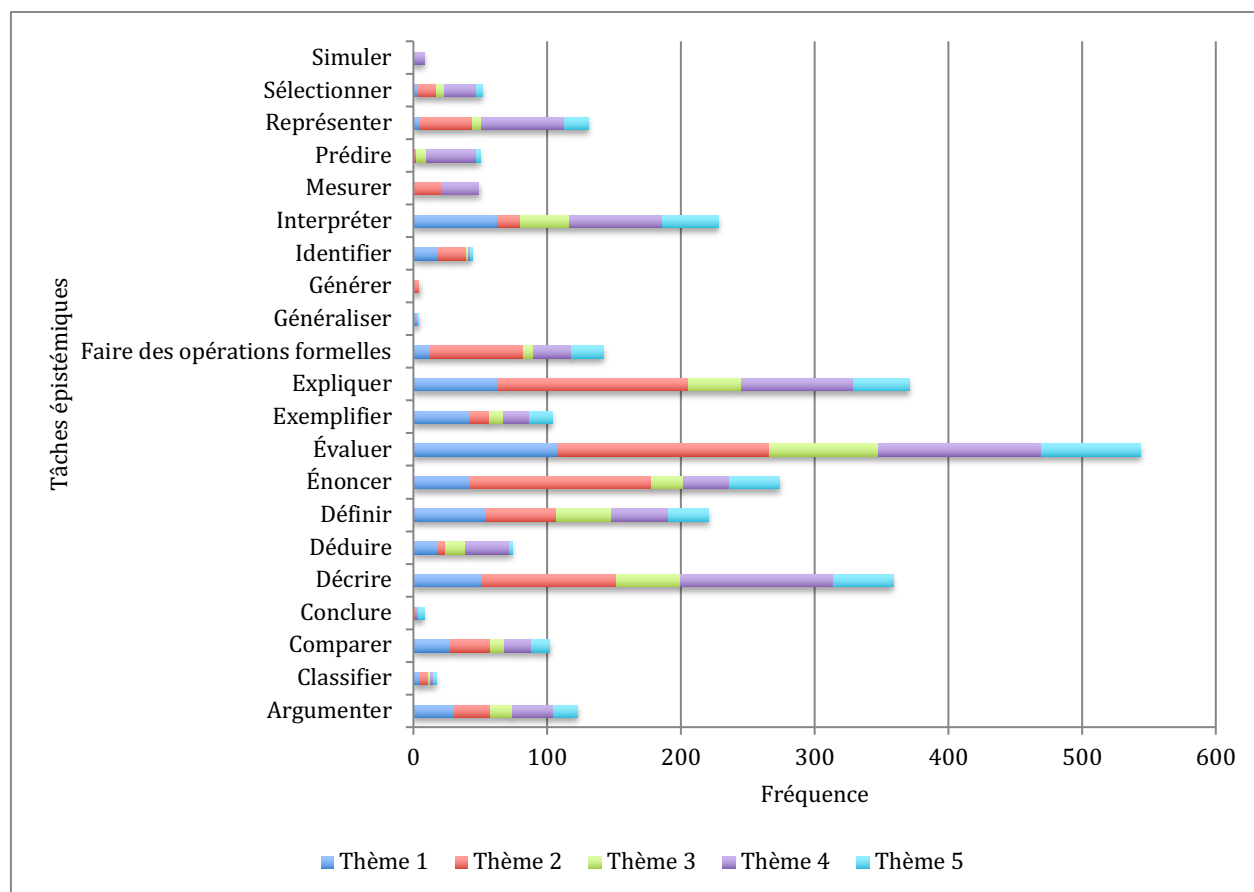


Figure 29- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans cette séquence d'enseignement, la prise en charge des tâches épistémiques, qu'elles soient suscitées ou réalisées par l'enseignante, les élèves ou le manuel scolaire, se fait essentiellement par l'enseignante. En effet, 66 % des tâches épistémiques sont prises en charge par l'enseignante alors que seulement 32 % le sont par les élèves et 2 % par le manuel scolaire (**figure 30**). De manière spécifique, sans distinguer si les tâches épistémiques sont suscitées ou réalisées, toutes les tâches sont davantage prises en charge par l'enseignante, et parmi celles-ci, certaines présentent un écart important sur le plan de leur distribution. C'est le cas des tâches épistémiques DÉFINIR (P : 175 ; E : 37), ÉVALUER (P : 400 ; E : 144), EXPLIQUER (P : 273 ; E : 95) et REPRÉSENTER (P : 94 ; E : 33) prises en charge 3 à 4 fois plus par l'enseignante que par les élèves. Dans cette séquence, seulement deux tâches épistémiques sont plus prises en charge par les élèves que par l'enseignante. Il s'agit plus particulièrement de la tâche épistémique MESURER (P : 7 ; E : 42), nettement du côté des élèves, et de la tâche épistémique PRÉDIRE (P : 24 ; E : 26) (**figure 31**).

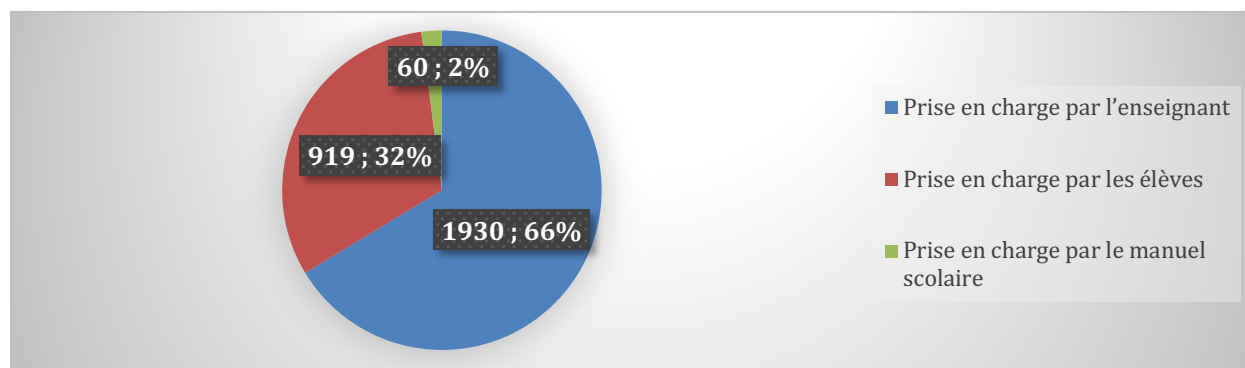


Figure 30- Prise en charge des tâches épistémiques (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

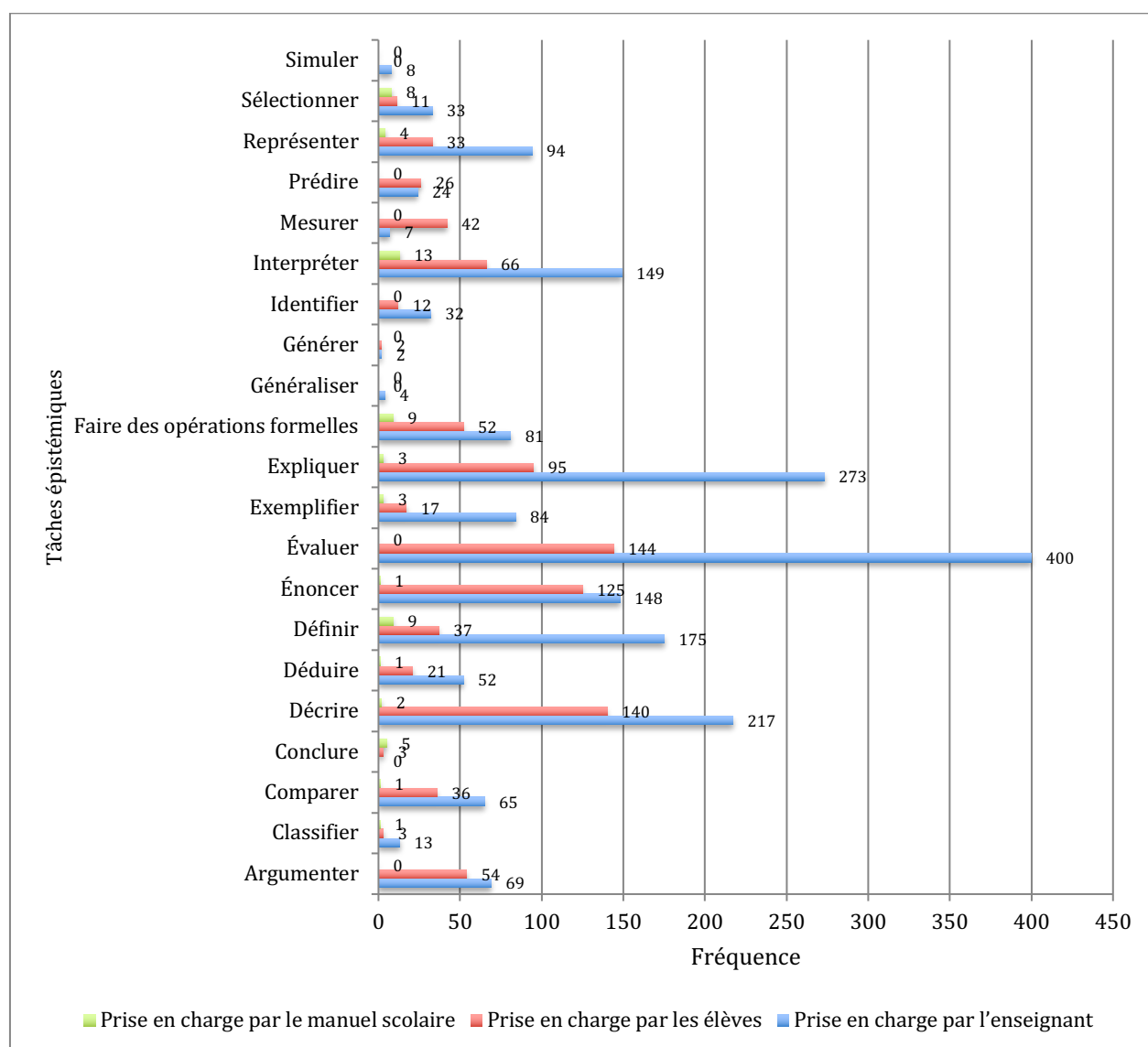


Figure 31- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon leur prise en charge (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Sur le plan des registres de modélisation, les tâches épistémiques sont essentiellement ancrées dans le monde des théories et de modèles (N=1598). Une moindre proportion des tâches épistémiques est ancrée dans le MOE (N=494) ou met en relation les deux mondes (N=817) (**figure 32**). La **figure 33** met en évidence une mobilisation très variable des registres de modélisation selon la nature de la tâche épistémique. En effet, les tâches épistémiques MESURER (44 tâches sur 49) et SIMULER (8 tâches sur 8) portent essentiellement sur le MOE ; les tâches épistémiques CLASSIFIER (14 tâches sur 17), COMPARER (70 tâches sur 102), CONCLURE (8 tâches sur 8), DÉCRIRE (188 tâches sur 359), DÉDUIRE (46 tâches sur 74), DÉFINIR (221 tâches sur 221), ÉNONCER (150 tâches sur 274), ÉVALUER (274 tâches sur 544), EXPLIQUER (290 tâches sur 371), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (142 tâches sur 142), GÉNÉRALISER (4 tâches sur 4), IDENTIFIER (25 tâches sur 44) et SÉLECTIONNER (42 tâches sur 52) portent essentiellement sur le MTM ; les tâches épistémiques EXEMPLIFIER (86 tâches sur 104), INTERPRÉTER (197 tâches sur 228), PRÉDIRE (48 tâches sur 50) et REPRÉSENTER (118 tâches sur 131) mettent davantage en relation le MOE avec le MTM.

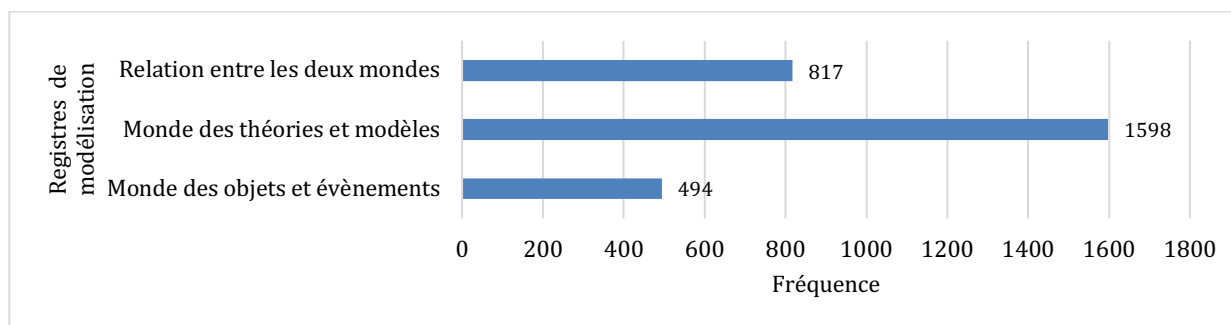


Figure 32- Registres de modélisation (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

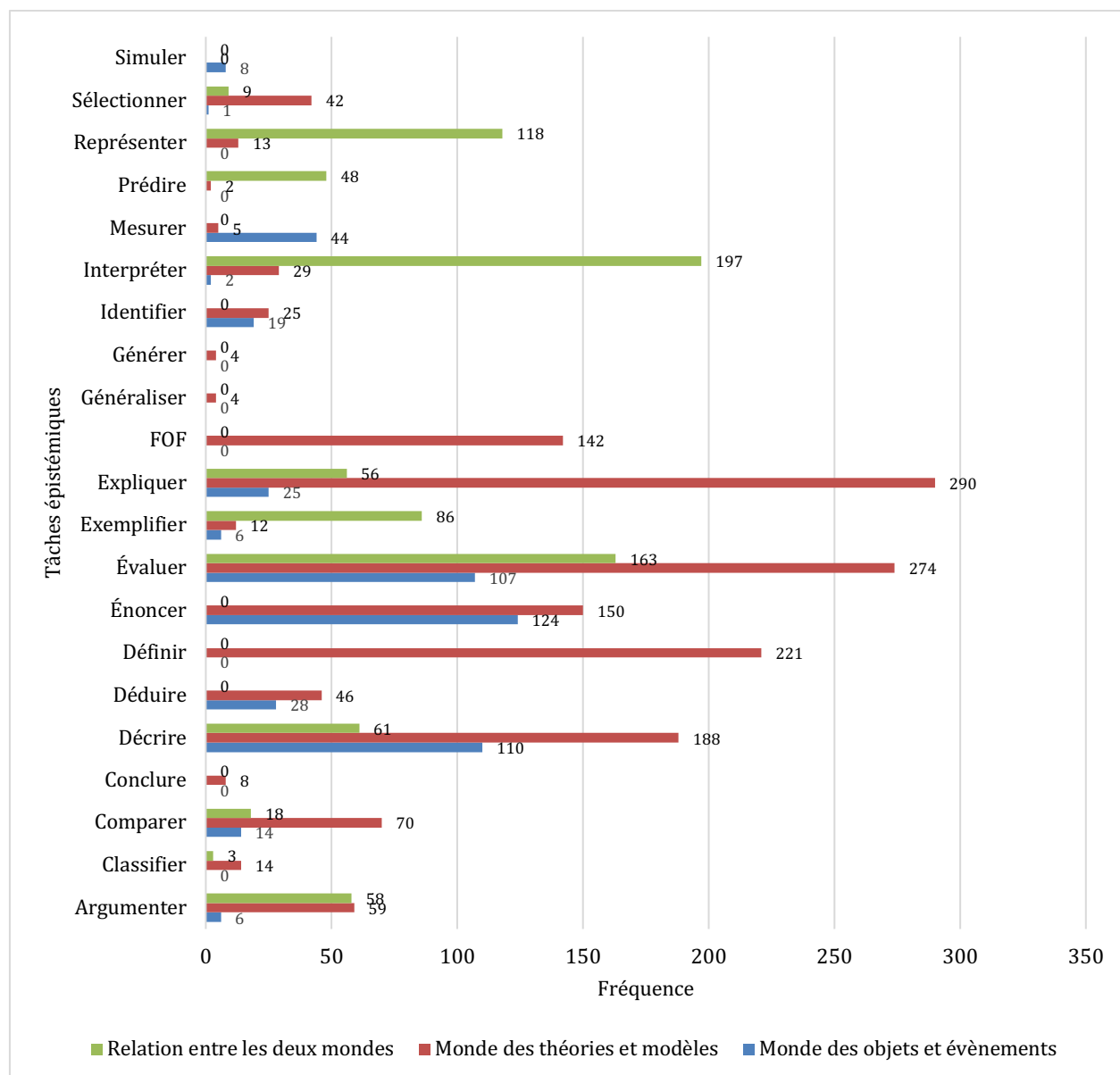


Figure 33- Distribution des tâches épistémiques selon les registres de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans ce qui suit, nous exposons les descriptions spécifiques des tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées quant à leur fréquence d'apparition ou à leur durée totale au cours de cette séquence. Ces tâches, décrites selon leur fréquence d'apparition dans l'ordre décroissant, sont accompagnées de trois exemples typiques de mobilisation dans l'un ou l'autre des registres de modélisation. Les autres tâches sont décrites à l'[annexe 23](#).



La tâche épistémique ÉVALUER présente une configuration qui se démarque des autres quant à sa fréquence d'apparition très importante (544 fois) sur la séquence. Comme c'est le cas de la tâche épistémique ÉNONCER, sa durée totale de 53 min 42 s et sa durée moyenne de 6 s sont toutefois relativement faibles. Cette tâche épistémique est suscitée ou fortement réalisée par l'enseignante. Elle est suscitée ou réalisée dans une moindre proportion par les élèves. La durée de la prise en charge de cette tâche est nettement plus grande du côté de l'enseignante (DP=44 min 40 s) que de celui des élèves (DE=9 min 2 s). Cette tâche prend ancrage dans les trois registres de modélisation, plus particulièrement dans le MTM (**figure 34**).

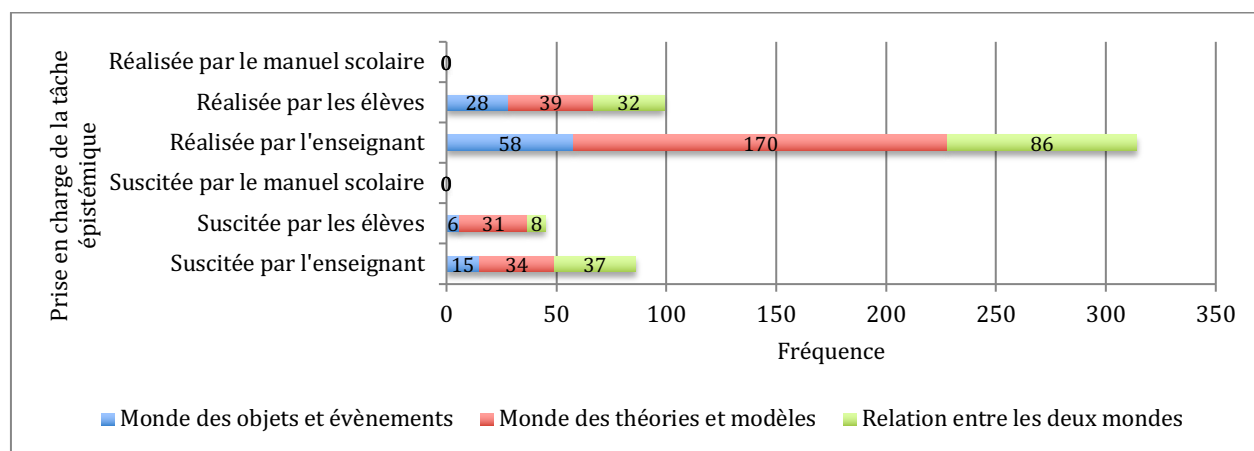


Figure 34- Tâche épistémique ÉVALUER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- l'équilibre d'un système avec l'introduction d'un vecteur force équilibrant expérimental (S4) ;
- la pertinence de données connues ou à rechercher, ou encore à évaluer de réponses obtenues dans des problèmes d'application lors des moments de réalisation ou de correction d'exercices (S8) ;
- la pertinence de facteurs expérimentaux pouvant influencer le mouvement (vitesse ou accélération) d'une balle sur le plan incliné (S11).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- une définition ou une comparaison entre la vitesse instantanée et la vitesse moyenne (S1, S7, S7) ;
- la somme vectorielle graphique théorique des deux vecteurs forces fixés et d'un vecteur équilibrant (S6) ;
- une procédure pour calculer l'accélération d'un mobile à partir d'un graphique de vitesse-temps (S9, S10).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- l'appartenance d'un événement au mouvement rectiligne (monter une côte) (S7) ;
- l'appartenance d'un événement (balle rebondissante) à un déplacement total nul (S10) ;

- une prédiction d'un tracé de graphique vitesse-temps d'un MRUA qui augmente sa vitesse dans le sens de référence (S11).

La tâche épistémique EXPLIQUER présente une configuration similaire à la tâche épistémique DÉFINIR. Sa fréquence d'apparition de 371 sur la séquence est très importante et elle occupe une part de temps avec une durée totale de 1 h 50 min 38 s, même si sa durée moyenne de 18 s est bien inférieure à celle de la tâche Définir. Cette dernière est aussi suscitée ou fortement réalisée par l'enseignante. Dans une moindre proportion, elle est suscitée ou réalisée par les élèves. La durée de la prise en charge de cette tâche est nettement plus grande du côté de l'enseignante (DP=1 h 44 min) que de celui des élèves (DE=6 min 18 s) ou du manuel scolaire (DM=10 s). Cette tâche prend essentiellement ancrage dans le MTM (**figure 35**).

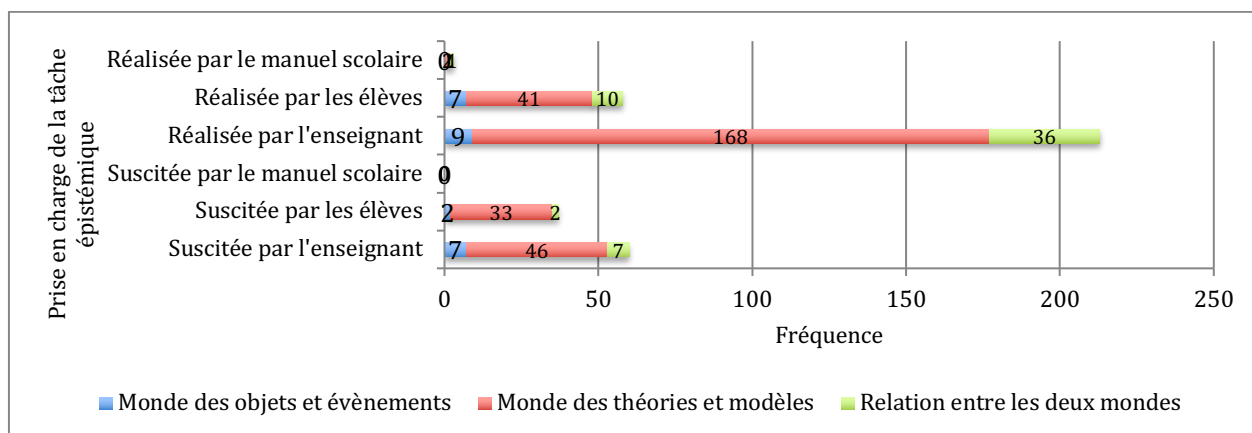


Figure 35- Tâche épistémique EXPLIQUER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- des manipulations à faire pour équilibrer un système de forces dans un laboratoire (S4) ;
- le principe de fonctionnement d'un chronomètre à étincelles (S7) ;
- la variation de la grandeur de l'accélération d'un mobile sur un plan incliné selon l'angle d'inclinaison du plan (S11).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- que le signe de l'accélération est toujours le même que celui du changement de vitesse, car le temps est toujours positif (S2) ;
- qu'une accélération constante est une variation de la vitesse régulière (S2) ;
- une procédure pour construire un graphique accélération-temps d'un mobile en MRUA à partir de son graphique vitesse-temps (S7).

Dans le registre de modélisation du MOE-MTM, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- que le signe de la variation de la vitesse est négatif, même si une voiture freine dans le sens contraire de la référence (S1) ;
- qu'en physique, l'accélération d'un mobile comprend les situations où il y a diminution de la vitesse (S2) ;
- que dans un mouvement en chute libre, l'accélération est la même dans le mouvement ascendant et le mouvement descendant (S11).

La tâche épistémique DÉCRIRE apparaît 359 fois dans la séquence avec une durée totale de 1 h 7 min 6 s et une durée moyenne de 13 s, cette dernière étant légèrement inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Si cette tâche épistémique est fortement suscitée ou réalisée par l'enseignante, elle est également réalisée en bonne partie par les élèves. La durée de la prise en charge est toutefois plus grande du côté de l'enseignante (DP=49 min 45 s) que du côté des élèves (DE=15 min 21 s) ou du manuel scolaire (DM=2 min). Cette tâche prend essentiellement ancrage dans le MTM, et dans une moindre proportion dans les autres registres de modélisation (**figure 36**).

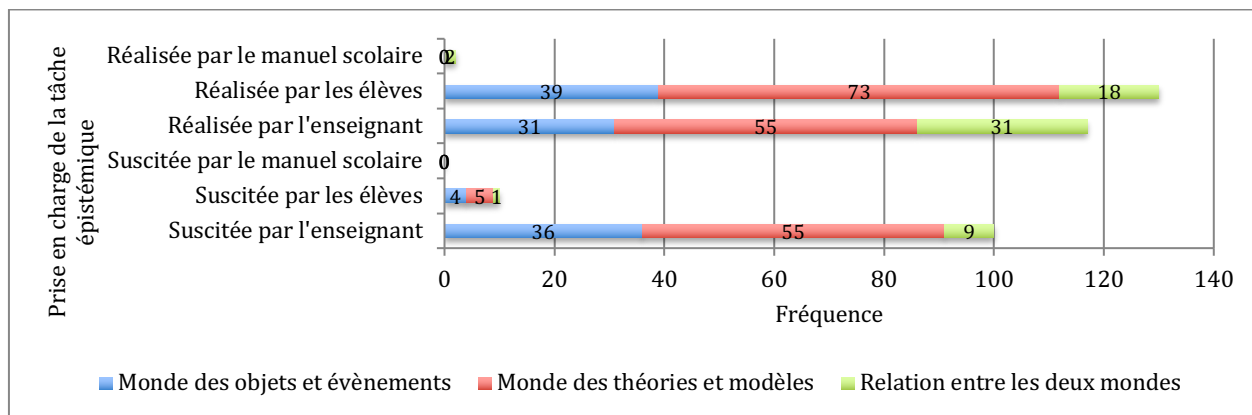


Figure 36- Tâche épistémique DÉCRIRE selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- une cause d'erreur dans un laboratoire (S8, S9) ;
- la distribution des points sur un ruban illustrant le mouvement d'un charriot tiré par une masse en chute libre (S7) ;
- la variation de la vitesse d'une balle dans son mouvement ascendant et son mouvement descendant (S2, S9, S10).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- la variation de la vitesse dans une accélération scalaire ou vectorielle constante (S2) ;
- la variation de la position dans un MRUA (S5) ;
- le type de relation mathématique associée à un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA (S8).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- la distribution des points sur le ruban d'un mobile en MRUA (S8) ;
- le signe de l'accélération d'une balle dans son mouvement ascendant et dans son mouvement descendant (S10) ;
- le type de relation ou le tracé associé au tracé d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'une voiture en MRUA (S10).

Si la tâche épistémique ÉNONCER apparaît un nombre élevé de fois dans la séquence avec une fréquence d'apparition totale de 274, sa durée totale de 37 min 52 s et sa durée moyenne de 8 s sont toutefois relativement faibles. Cette tâche est fortement suscitée par l'enseignante, mais réalisée par les élèves, et dans une moindre proportion par l'enseignante. Sur le plan de la durée de la prise en charge, celle-ci est toutefois plus grande du côté de l'enseignante (DP=33 min 33 s) que du côté des élèves (DE=5 min 16 s) ou du manuel scolaire (DM=3 s). Cette tâche prend ancrage dans le MOE ou dans le MTM. Dans aucun cas elle met relation le MOE avec le MTM (**figure 37**).

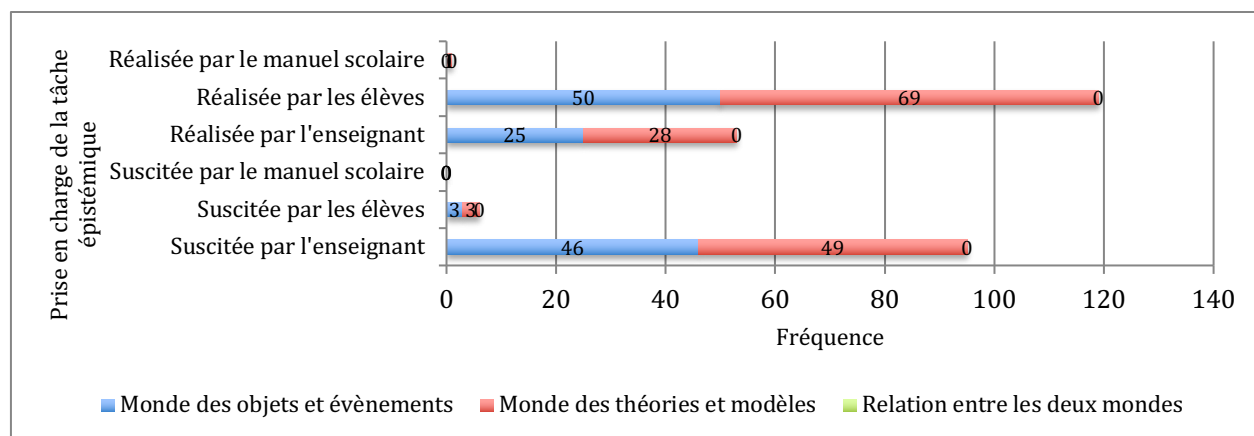


Figure 37- Tâche épistémique ÉNONCER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à énoncer :

- des réponses à des problèmes d'application lors des moments de réalisation ou de correction d'exercices comme la distance parcourue par un mobile sachant une vitesse et d'un temps, le temps de déplacement d'un mobile sachant une vitesse et une distance parcourue, la distance parcourue entre deux objets dans le plan cartésien, la vitesse d'une balle en chute libre à un intervalle de temps donné de son mouvement, l'accélération moyenne d'un mobile sachant la vitesse initiale, la vitesse finale et le temps.

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à énoncer :

- une procédure pour calculer l'angle d'orientation d'un vecteur à partir de son angle alpha (S3) ;
- des méthodes d'addition vectorielle (S3) ;
- les principaux types de graphiques permettant de décrire des MRUA (S10).

La tâche épistémique INTERPRÉTER apparaît 228 fois sur la séquence avec une durée totale de 38 min 50 s et une durée moyenne de 10 s, cette dernière étant inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Celle-ci est suscitée ou fortement réalisée par l'enseignante, mais elle est également réalisée par les élèves ou le manuel scolaire dans une moindre proportion. La durée de la prise en charge de cette tâche est nettement plus grande du côté de l'enseignante (DP=32 h 30 min) que de celui des élèves (DE=2 min 40 s) ou du manuel scolaire (DM=2 min 40 s). Cette tâche met essentiellement en relation le MOE avec le MTM (**figure 38**).

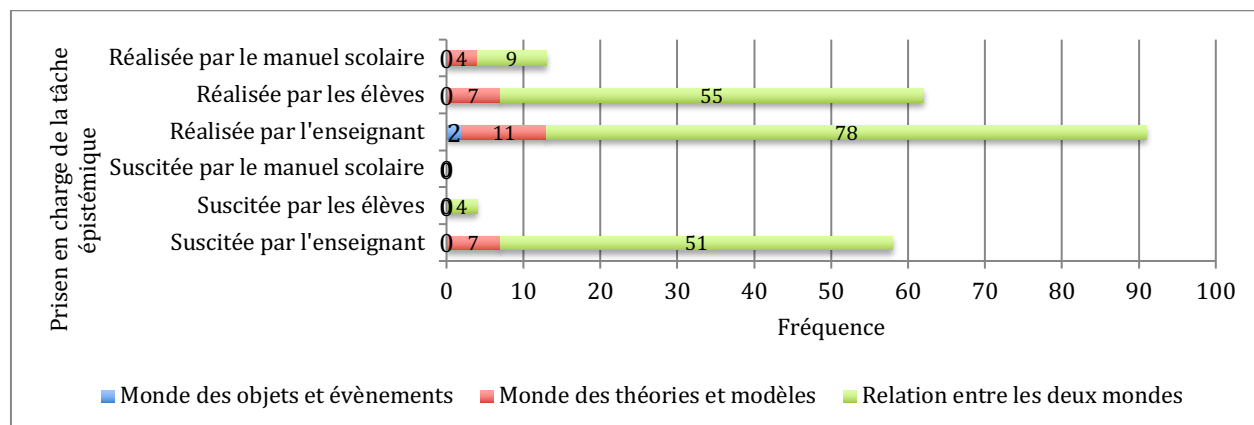


Figure 38- Tâche épistémique INTERPRÉTER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à interpréter :

- une augmentation de la vitesse dans le sens de la référence par une variation de vitesse positive (S2) ;
- le tracé du graphique position-temps qui correspond à une demi-parabole horizontale et croissante par une accélération négative (S7) ;
- la pente du tracé d'un graphique position-temps par la variation de la position sur la variation du temps (S10).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à interpréter :

- le mouvement d'une voiture qui augmente sa vitesse dans le sens de la référence (vers la droite) sur l'axe des  $x$  par une variation de vitesse positive (S2) ;
- la grandeur de la vitesse moyenne et de la vitesse instantanée d'une voiture à partir du graphique position-temps (S7) ;
- la variation de la vitesse d'une balle en chute libre dans son mouvement descendant (S11).

La tâche épistémique DÉFINIR présente une configuration qui se démarque des autres. Elle apparaît 221 fois dans la séquence et occupe une part de temps très importante avec une durée totale de 3 h 00 min 11 s et une durée moyenne de 49 s, cette dernière étant largement supérieure

à la durée moyenne des tâches épistémiques : elle est suscitée ou fortement réalisée par l'enseignante et réalisée dans une moindre proportion par les élèves. La durée de la prise en charge de cette tâche est nettement plus grande du côté de l'enseignante (DP=2 h 22 min 40 s) que de celui des élèves (DE=30 min 10 s) ou du manuel scolaire (DM=7 min 21 s). Cette tâche prend uniquement ancrage dans le MTM (**figure 39**).

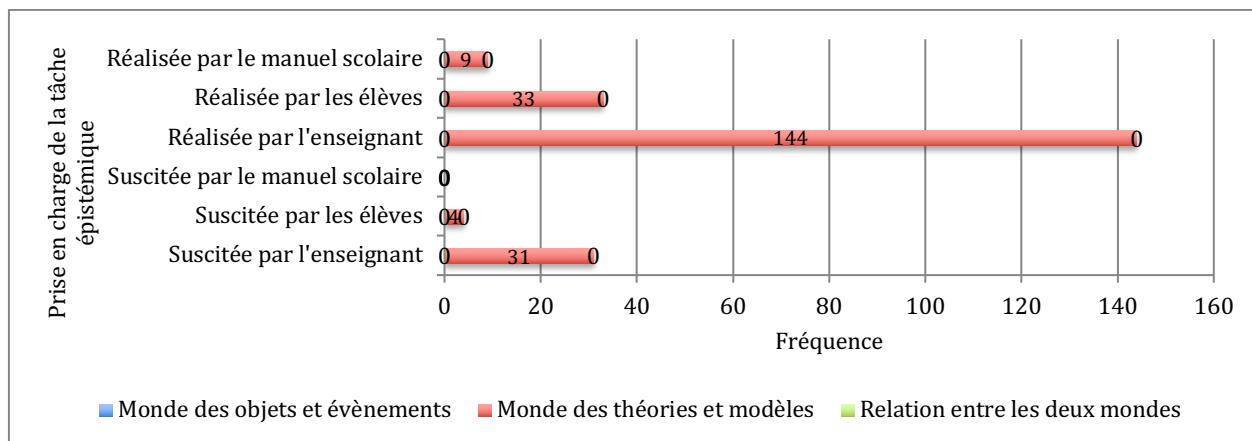


Figure 39- Tâche épistémique DÉFINIR selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à définir :

- un nombre important de concepts de la physique cinématique, comme ceux de trajectoire aléatoire (S5), de position, de distance parcourue (S1), de déplacement (S1), de vecteur déplacement (S1, S5, S6), de vitesse (S1), de vecteur vitesse (S3), de vitesse instantanée (scalaire ou vectorielle) (S1), de vitesse moyenne (scalaire ou vectorielle) (S1), de variation de la vitesse (S1), d'accélération (S5), d'accélération instantanée (scalaire ou vectorielle) (S2), d'accélération moyenne (scalaire ou vectorielle) (S2), de MRU (S5, S7), de mouvement rectiligne non uniforme (S5), MRUA (S10), de grandeur vectorielle, de grandeur scalaire (S1), ainsi que de norme et d'orientation d'un vecteur (S5) ;
- les formules mathématiques de la vitesse (vectorielle ou scalaire) moyenne, de la vitesse (vectorielle ou scalaire) instantanée ou de variation de la vitesse (S1, S11) ;
- les formules mathématiques associées au MRUA (S10).

La tâche épistémique FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES apparaît 142 fois dans la séquence avec une durée totale de 3 h 50 min 18 s et une durée moyenne de 21 s, cette dernière étant largement supérieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Celle-ci est fortement suscitée par l'enseignante, mais elle est aussi réalisée en bonne partie par les élèves. La durée de la prise en charge de cette tâche est toutefois plus grande du côté de l'enseignante (DP=33 min) que de celui des élèves (DE=17 min 6 s) ou du manuel scolaire (DM=13 s). Cette tâche prend uniquement ancrage dans le MTM (**figure 40**).

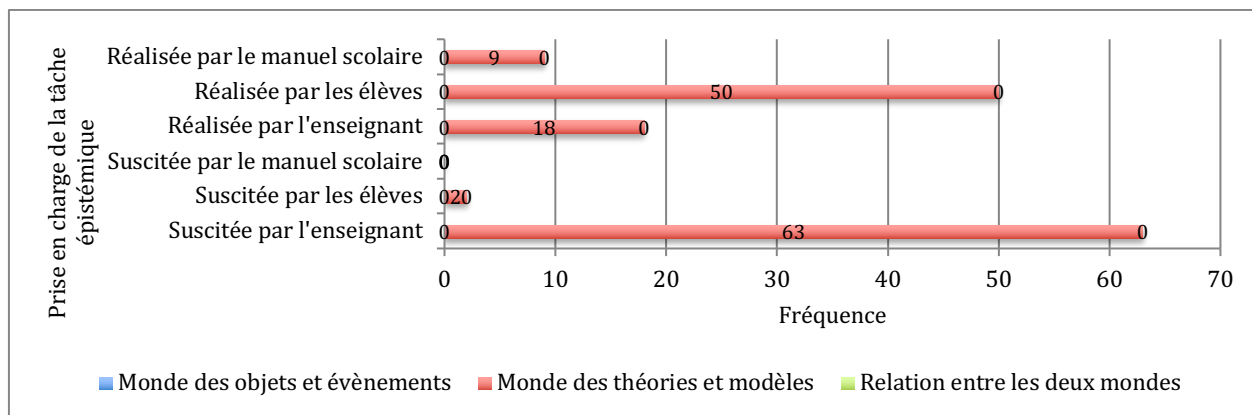


Figure 40- Tâche épistémique FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à faire différentes opérations formelles, par exemple calculer :

- la variation de la vitesse du mobile dans des intervalles de temps d'un graphique vitesse-temps (S7) ;
- l'aire sous la courbe d'un graphique vitesse-temps (S7, S9) ou d'un graphique accélération-temps (S11) ;
- la norme d'un vecteur position ou vitesse résultant dans un système (S3, S5, S6).

### 3.2.2 Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des tâches épistémiques

Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, les tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées en regard de leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus) sont, dans l'ordre décroissant, les tâches : ÉVALUER, EXPLIQUER, DÉCRIRE, ÉNONCER, INTERPRÉTER et DÉFINIR. La durée moyenne des tâches épistémiques varie considérablement selon leur nature. La durée moyenne des tâches épistémiques GÉNÉRALISER, DÉFINIR et CONCLURE est largement supérieure à la durée moyenne de l'ensemble des tâches épistémiques qui est d'environ 15 s. Si nous appréhendons les tâches épistémiques sous l'angle de leur durée, nous relevons que dans une large proportion du temps de cette séquence d'enseignement, la construction du savoir se fait par des explications, des définitions ou sous la forme de descriptions.

Si le niveau taxonomique des tâches épistémiques en jeu varie entre le premier et le cinquième niveau de cognition, nous observons néanmoins une propension des tâches épistémiques DÉFINIR et INTERPRÉTER dans le deuxième niveau de cognition, ce qui indique que la construction du savoir se fait, notamment, par des tâches épistémiques de faible niveau de complexité.

Sur le plan thématique, les tâches épistémiques de cette séquence se déclinent dans l'ensemble des thèmes disciplinaires et leur densité (nombre de tâches épistémiques par minute) est

variable (entre 3 et 7 tâches par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues). Nous constatons que les thèmes disciplinaires qui touchent directement les modèles du mouvement MRU et MRUA sont beaucoup plus denses que ceux qui concernent les variables du mouvement comme la position, le déplacement, la vitesse ou l'accélération. En particulier, la densité thématique (6,3 tâches par minute) pour le MRUA est très élevée. La modélisation du mouvement des objets matériels accentuerait la fréquence de mobilisation des tâches épistémiques.

Quant à la prise en charge des tâches épistémiques, qu'elles soient suscitées ou réalisées par l'enseignante, elle se fait par l'enseignante dans près de 70 % des cas. Plus précisément, pour les 21 tâches épistémiques en jeu, 19 d'entre elles sont plus fréquemment prises en charge par l'enseignante. Il apparaît que les tâches épistémiques DÉFINIR, ÉVALUER, EXPLIQUER et REPRÉSENTER sont prises en charge 3 à 4 fois plus par l'enseignante que par les élèves. Seules les tâches épistémiques MESURER et PRÉDIRE sont davantage prises en charge par les élèves. Dans cette séquence, les élèves ont peu l'occasion de prendre en charge des tâches épistémiques dont le niveau de complexité est variable.

Sur le plan des registres de modélisation, plus de la moitié des tâches épistémiques (55 %) prend ancrage dans le MTM, alors qu'une faible proportion de celles-ci le prend dans le MOE (17 %) ou met en relation les deux mondes (MOE-MTM) (28 %). Ainsi, une priorité est accordée à la construction du registre théorique au détriment de la construction du registre empirique. Nos analyses indiquent, par ailleurs, que si les registres de modélisation sont mobilisés de manière variable selon la nature des tâches épistémiques, c'est le registre du MTM qui est le plus souvent sollicité, soit dans les tâches CLASSIFIER, COMPARER, CONCLURE, DÉCRIRE, DÉDUIRE, DÉFINIR, ÉNONCER, ÉVALUER, EXPLIQUER, FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, GÉNÉRALISER, IDENTIFIER et SÉLECTIONNER. Ces résultats témoignent de la faible préoccupation de l'enseignante 1 à ce que les élèves puissent construire un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique.

En effet, dans cette classe, nous observons une faible proportion de temps accordé aux élèves pour explorer des objets divers (ex. : montages, matériels de laboratoire, procédures de recueils de données, etc.) du registre empirique, et de même, une proportion de temps relativement faible pour mettre en relation ces objets avec des événements pouvant être modélisés par l'un ou l'autre des deux modèles du mouvement : le MRU et le MRUA (le MB n'ayant pas été étudié dans cette séquence).

### 3.2.3 Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des facettes de savoir

Cette séquence d'enseignement qui s'étale sur 11 séances met en jeu 650 facettes de savoir. La distribution des groupes de facettes ne se fait pas de manière continue sur l'ensemble des séances. Ces groupes de facettes se distribuent essentiellement sur les séances 1, 2, 5, 7, 9, 10 et 11. Contrairement à ces dernières, les séances 3, 4, 6 et 8 ne sont pas riches en matière d'introduction



de facettes, car c'est le thème disciplinaire Vecteurs qui prédomine dans ces séances. Les **figures 41 et 42** montrent que les groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION, MRU et MRUA prédominent quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence, lesquelles comportent au moins le double du nombre de facettes par rapport aux autres groupes.

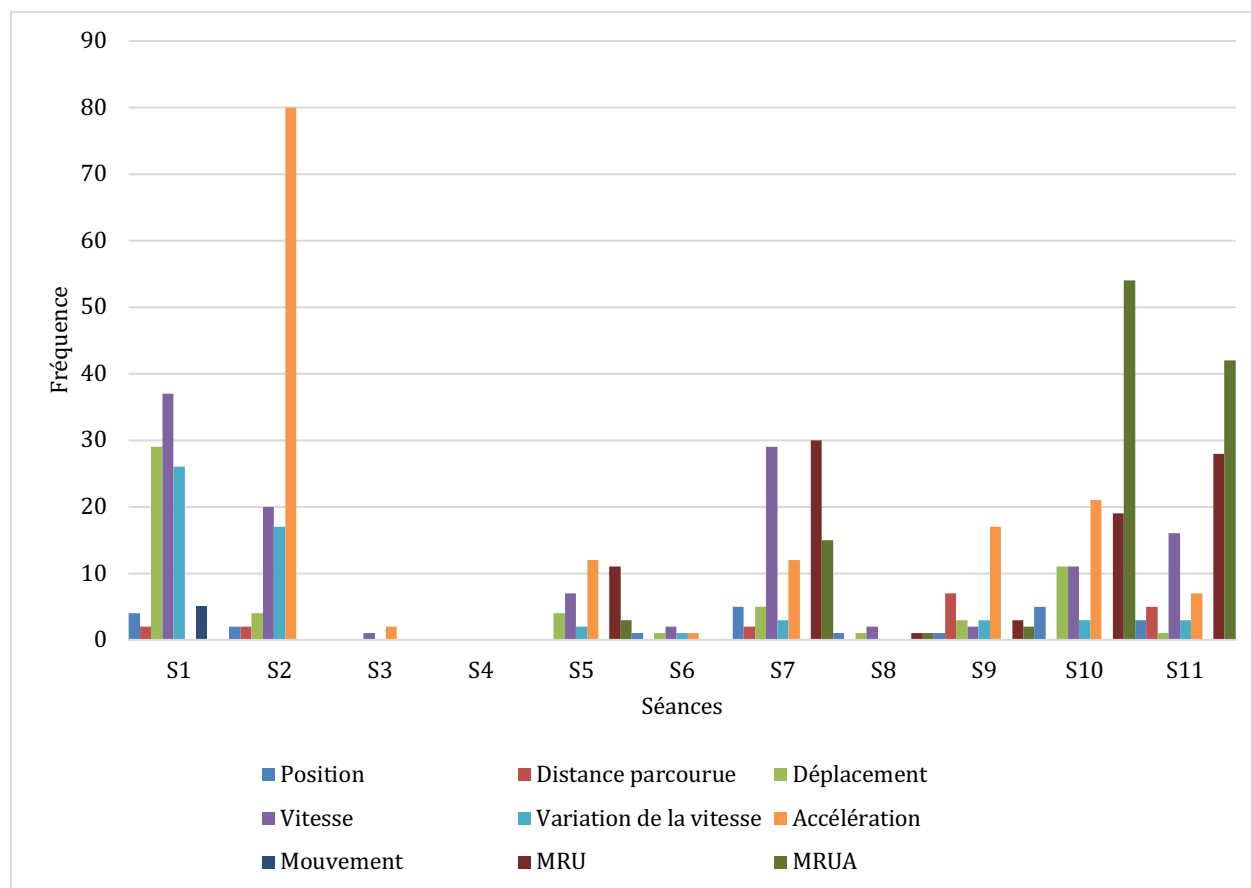


Figure 41- Distribution des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignante 1

La **figure 42** présente la distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires. Elle met en évidence des écarts importants entre les groupes de facettes. Ceux-ci se distribuent dans des proportions variables selon les thèmes disciplinaires retenus par l'enseignante. Certains thèmes disciplinaires mobilisent davantage des groupes de facettes particuliers. C'est le cas du thème 1-Variables du mouvement qui mobilise essentiellement les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, ACCÉLÉRATION ; du thème 3-MRU qui mobilise essentiellement les groupes de facettes VITESSE et MRU, et du thème 4-MRUA qui mobilise essentiellement les groupes de facettes ACCÉLÉRATION et MRUA.

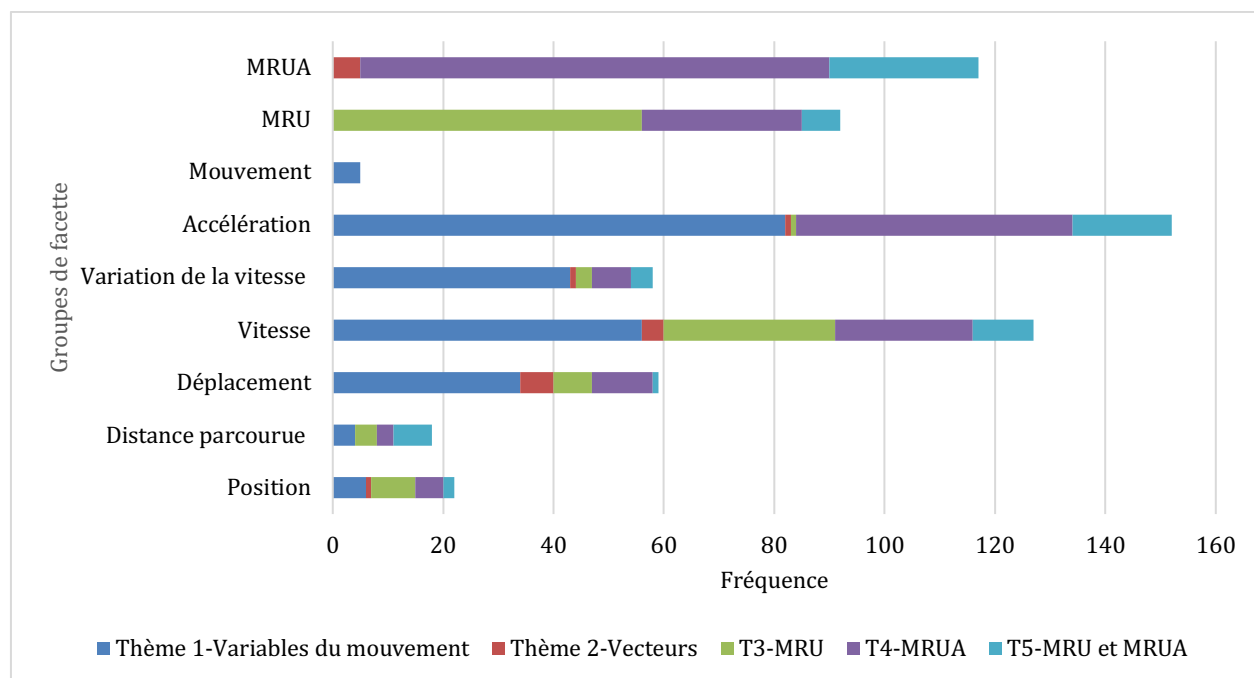


Figure 42- Distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Le **tableau 29** montre que la densité des groupes de facettes (nombre de facettes introduites d'un même groupe à l'heure) selon les séances est très variable. En effet, la séance 1 est très dense pour les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE et VARIATION DE LA VITESSE dont les densités respectives se situent entre 25 et 35 facettes à l'heure. La séance 2 est très dense pour le groupe de facettes ACCÉLÉRATION dont la densité est de 66,7 facettes à l'heure. La séance 7 est très dense pour le groupe de facettes MRU dont la densité est de 24 facettes à l'heure. La séance 10 est très dense pour le groupe de facettes MRUA dont la densité est de 47 facettes à l'heure. Enfin, la séance 11 est également très dense pour le groupe de facettes MRUA dont la densité est de 32,8 facettes à l'heure. Quant au **tableau 30**, il met en évidence la grande variabilité de la densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires : les groupes de facettes DÉPLACEMENT ( $D=11,5$ ), VITESSE ( $D=19$ ), VARIATION DE LA VITESSE ( $D=14,6$ ) et ACCÉLÉRATION ( $D=27,6$ ) sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1 ; les groupes de facettes VITESSE ( $D=28,7$ ) et MRU ( $D=51,9$ ) sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3 ; et les groupes de facettes ACCÉLÉRATION ( $D=21,3$ ) et MRUA ( $D=36,1$ ) sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 4. Globalement, au niveau de la séquence (tous les thèmes disciplinaires confondus), quatre groupes de facettes se démarquent des autres quant à leur plus grande densité moyenne. Il s'agit des groupes de facettes VITESSE ( $DM=10,2$ ), ACCÉLÉRATION

(DM=12,1), MRU (DM=9,3) et MRUA (DM=8,9) dont les densités moyennes sont nettement supérieures aux autres groupes (**tableaux 29 et 30**).

Tableau 29 : Densité des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignante 1

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	DM
<b>Position</b>	3.6	1.7	0	0	0	0.8	4	1.2	1.1	4.3	2.5	1.75
<b>Distance parcourue</b>	1.8	1.7	0	0	0	0	1.6	0	7.6	0	4.1	1.43
<b>Déplacement</b>	<b>26.4</b>	3.3	0	0	3.2	0.8	4	1.2	3.3	9.6	0.8	4.7
<b>Vitesse</b>	<b>33.7</b>	16.7	0.8	0	5.7	1.6	<b>23.2</b>	2.35	2.2	9.6	13.1	<b>10.2</b>
<b>Variation de la vitesse</b>	<b>24.6</b>	14.1	0	0	1.6	1.6	2.4	0	0	2.6	2.45	4.6
<b>Accélération</b>	0	<b>66.7</b>	1.6	0	9.6	0.8	9.6	0	18.5	18.2	5.7	<b>12.1</b>
<b>Mouvement</b>	4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4
<b>MRU</b>	0	0	0	0	0,8	0	<b>24</b>	1.2	3.1	16.5	23	<b>7.3</b>
<b>MRUA</b>	0	0	0	0	2.4	0	12	1.2	2.2	<b>47</b>	32.8	<b>9.3</b>

Tableau 30 : Densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

	Thème 1 Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	T3 MRU	T4 MRUA	T5 MRU et MRUA	DM
<b>Position</b>	2	0.2	0.9	2.1	1.5	1.75
<b>Distance parcourue</b>	1.4	0	1.4	1.3	5.3	1.43
<b>Déplacement</b>	11.5	1.2	6.5	11.6	0.8	4.7
<b>Vitesse</b>	19	0.8	<b>28.7</b>	10.6	8.3	10.2
<b>Variation de la vitesse</b>	14.6	0.2	2.8	3	1.8	4.6
<b>Accélération</b>	<b>27.8</b>	0.2	0.9	<b>21.3</b>	13.6	12.1
<b>Mouvement</b>	1.7	0	0	0	0	0.4
<b>MRU</b>	0	1	<b>51.9</b>	12.4	5.3	9.3
<b>MRUA</b>	0	0	0	<b>36.1</b>	<b>20.5</b>	8.9

Sur le plan du contexte de traitement des thèmes disciplinaires, la **figure 43** met en évidence que les groupes de facettes sont essentiellement introduits dans des moments de théorisation ou dans des moments d'exercisation. Les groupes de facettes POSITION, DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, MRU et MRUA font l'objet d'une introduction plus importante lors des

moments de théorisation, alors que les groupes de facettes DISTANCE PARCOURUE, ACCÉLÉRATION ET MOUVEMENT font l'objet d'une introduction plus importante lors des moments d'exercisation (réalisation ou correction). Seuls les groupes de facettes POSITION, DÉPLACEMENT, ACCÉLÉRATION et MRUA comportent des facettes introduites au sein des laboratoires, et ce, dans une proportion relativement faible par rapport aux deux contextes de traitement des thèmes disciplinaires.

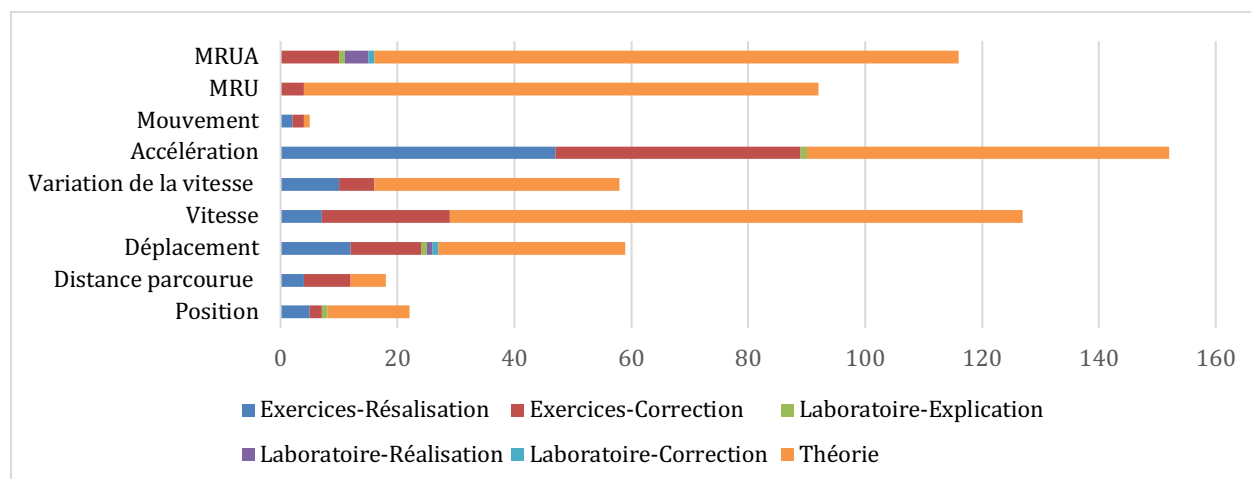


Figure 43- Distribution des groupes de facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Sur le plan de la source d'émergence des facettes de savoir, la **figure 44** met en évidence que les facettes de ces groupes émergent essentiellement de manière décontextualisée, de situations fictives ou de ressources didactiques. Les groupes de facettes POSITION, DISTANCE PARCOURUE, DÉPLACEMENT et VARIATION DE LA VITESSE sont ceux dont les facettes de savoir émergent le plus souvent à travers des situations fictives, alors que les groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION et MRU sont ceux dont les facettes de savoir émergent de manière décontextualisée ou à travers des situations fictives dans une proportion égale. Enfin, les facettes de savoir du groupe de facettes MRUA émergent davantage des ressources didactiques. Dans une moindre proportion, la plupart des groupes de facettes comportent également des facettes qui émergent de démonstrations ou de situations expérimentales.

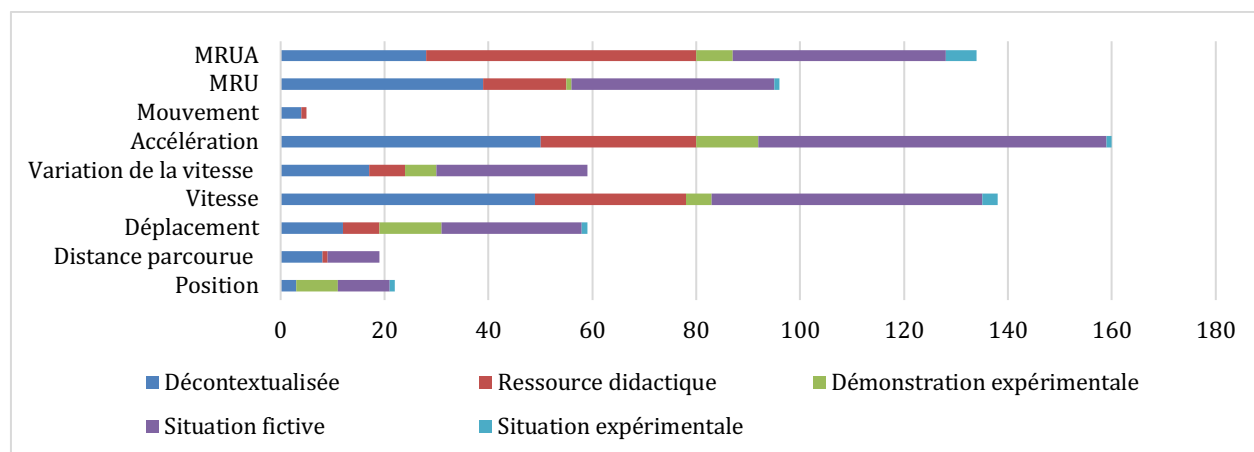


Figure 44- Distribution des groupes de facettes selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1

Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, la plupart des groupes de facettes sont introduits en marge d'une démarche de modélisation quelconque, hormis les groupes VITESSE, MOUVEMENT et MRUA qui comportent quelques facettes de savoir introduites dans les phases *Problématiser*, *Investiguer* et *Conceptualiser et déployer* d'une démarche de modélisation (figure 45).

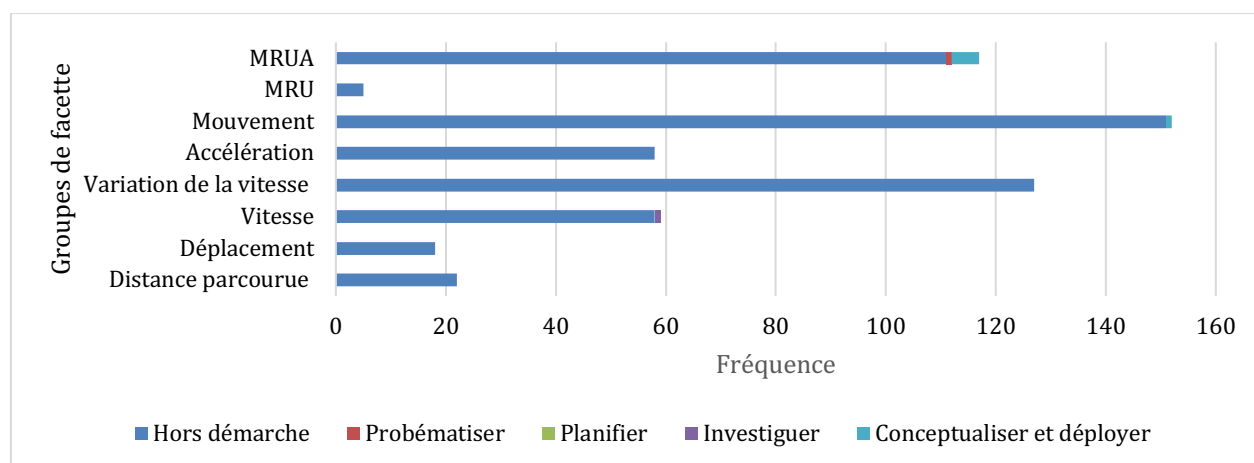


Figure 45- Distribution des groupes de facettes selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

Sur le plan des types de facettes de savoir, trois types de facettes se démarquent des autres en regard de leur fréquence d'apparition sur la séquence : les facettes conceptuelles, suivies des facettes symboliques-algébriques et des facettes symboliques-graphiques. Ce sont de loin les facettes conceptuelles qui prédominent dans la plupart des groupes de facettes, soit dans les groupes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, ACCÉLÉRATION, MOUVEMENT et MRU. Quant

aux facettes symboliques-algébriques, elles prédominent dans le groupe de facettes MRUA. Enfin, les facettes symboliques-graphiques prédominent pour leur part dans le groupe de facettes Position et font toutefois l'objet d'une introduction relativement importante dans les groupes MRU et MRUA (figure 46).

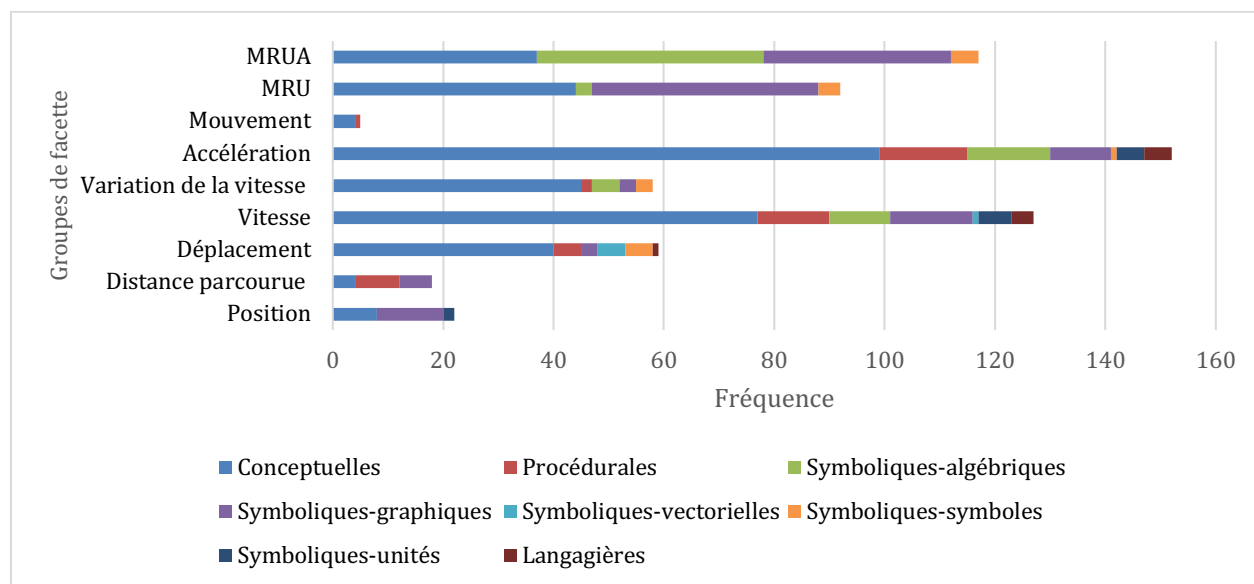


Figure 46- Distribution des groupes de facettes selon leurs types chez l'enseignante 1

Enfin, sur le plan de la responsabilité des acteurs pour la prise en charge des facettes de savoir, nous observons que cette responsabilité est largement du côté de l'enseignante pour la plupart de groupes de facettes. Toutefois, dans le groupe de facettes MRUA, la configuration est différente de celle des autres groupes : la responsabilité de l'introduction des facettes de savoir est davantage du côté des élèves ou partagée entre l'enseignante et les élèves (figure 47). Dans cette séquence, c'est donc l'enseignante qui est la principale responsable de l'introduction du savoir.

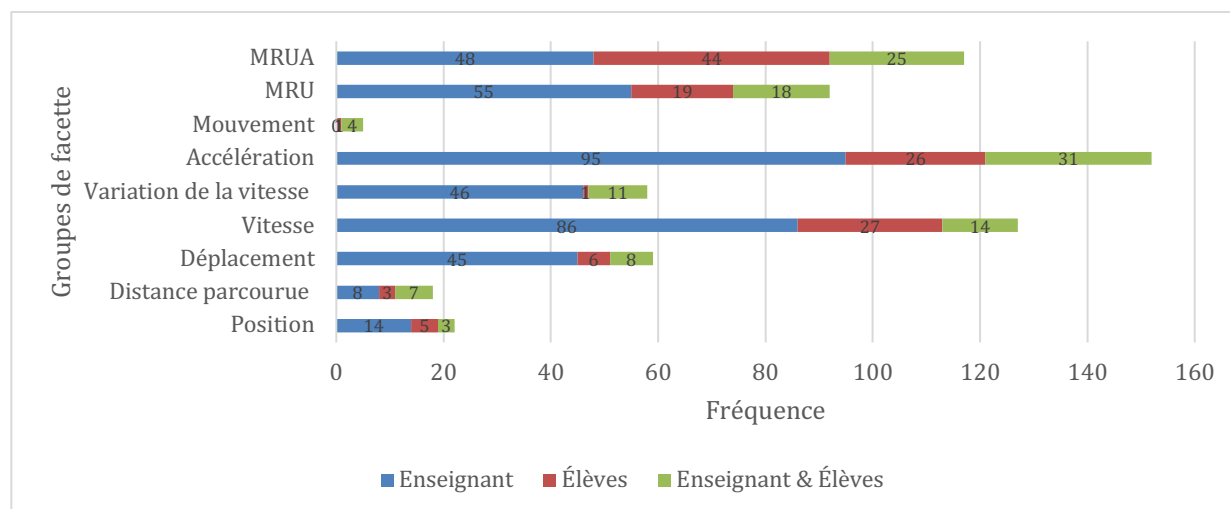


Figure 47- Distribution des groupes de facettes selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1

Dans les sous-sections suivantes, nous exposons de manière plus détaillée les résultats en regard des facettes de savoir qui prédominent quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence. Nous illustrons, par des exemples typiques, chacun de ces groupes de facettes. Dans l'[annexe 22](#), nous décrivons les autres résultats en lien avec les groupes de facettes POSITION, DISTANCE PARCOURUE et DÉPLACEMENT et VARIATION DE LA VITESSE.

### 3.2.3.1 Groupe de facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne)

Le groupe de facettes VITESSE est divisé en trois sous-groupes : vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne ([annexe 19, tableau 4 à 6](#)). Trente-six facettes sont distribuées dans ces 3 sous-groupes avec 22 facettes conceptuelles, 4 procédurales, 4 symboliques-algébriques, 1 symbolique-vectorielle, 3 symboliques-graphiques, 1 symbolique-unité et 1 langagière. La fréquence d'apparition totale des facettes est de 38 facettes pour le sous-groupe VITESSE, 33 facettes pour le sous-groupe VITESSE INSTANTANÉE et 56 facettes pour le sous-groupe VITESSE MOYENNE. Globalement, la fréquence d'apparition totale du groupe VITESSE est de 127 facettes pour l'ensemble des séances ([annexe 19, tableau 7](#)).

Les facettes VITESSE sont introduites dans presque toutes les séances et dans tous les thèmes disciplinaires. Cependant, c'est dans la séance 1 (N=37) et la séance 7 (N=29) qu'apparaissent davantage les facettes de ce groupe ([figure 48](#)).

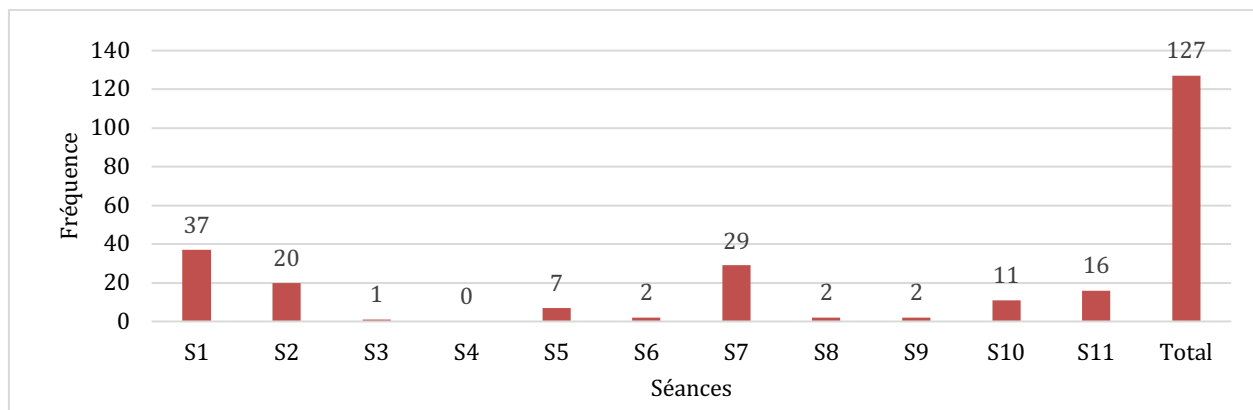


Figure 48- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les séances chez l'enseignante 1

Outre leur fréquence d'apparition importante dans le thème 1-Variables du mouvement (N=59), elles font également l'objet d'une introduction assez importante dans le thème 3-MRU (N=31), le thème 4-MRUA (N=25) et le thème 5- MRU et MRUA (N=11) (**figure 49**).

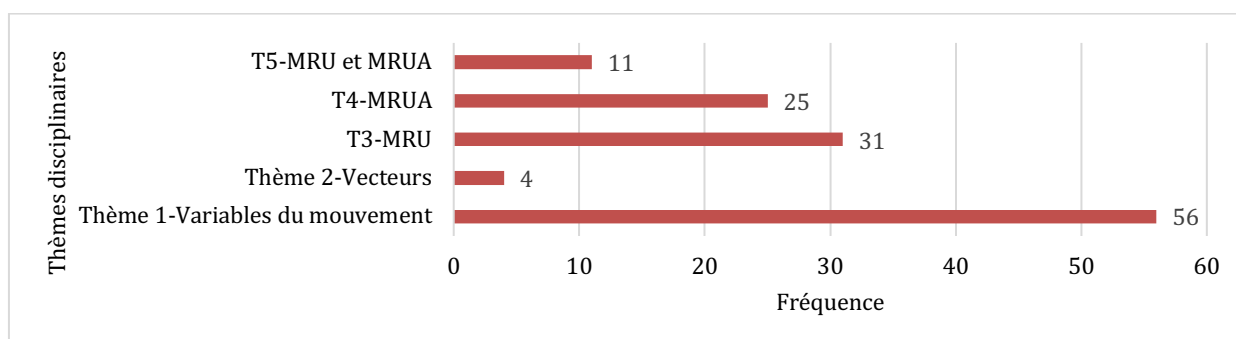


Figure 49- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

La densité des facettes VITESSE est très variable selon les séances : si elle est très faible pour la plupart des séances, soit les séances 3, 4, 5, 6, 8, 9 et 10 (entre 0 et 9,6), elle est faible pour les séances 2 et 11 (D=16,7 et 13,1), moyenne pour la séance 7 (D=23,2) et forte pour la séance 1 (D=33,7) (**tableau 31**). Quant à la densité thématique, elle est très faible pour le thème 2-Vecteurs (D=0,8) et le thème 5-MRU et MRUA (D=8,3), faible pour le thème 4-MRUA (D=10,6) et le thème 1-Variables du mouvement (D=19), mais moyenne pour le thème 3-MRU (D=28,7). Globalement, la densité moyenne des facettes VITESSE est de 10,3 au niveau de la séquence (**tableaux 31 et 32**).



Tableau 31 : Densité des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les séances chez l'enseignante 1

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Densité moyenne
33.7	16.7	0.8	0	5.7	1.6	23.2	2.35	2.2	9.6	13.1	10.2

Tableau 32 : Densité des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Thème 1 Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	Thème 3 MRU	Thème 4 MRUA	Thème 5 MRU et MRUA	Densité moyenne
19	0.8	28.7	10.6	8.3	10.2

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes VITESSE se déploient pour la plupart dans des moments de théorisation (98 facettes sur 127) et dans une moindre proportion dans les moments d'exercisation (29 facettes sur 127). Aucune facette VITESSE n'est introduite dans les laboratoires (figure 50).

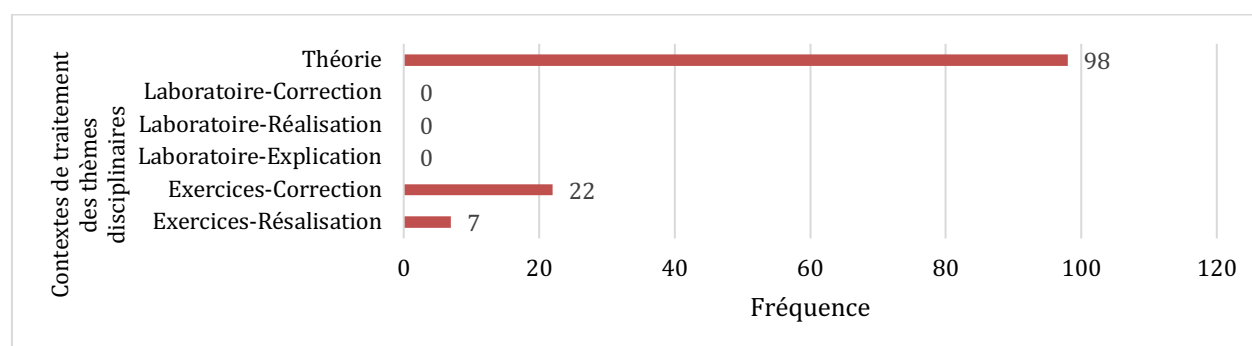


Figure 50- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante

Les facettes VITESSE sont essentiellement introduites dans des situations fictives (52 facettes sur 127), de manière décontextualisée (49 facettes sur 127) ou en s'appuyant sur des ressources didactiques (29 facettes sur 59) (figure 51). Seules quelques facettes de ce groupe sont introduites dans des démonstrations expérimentales (5 facettes sur 127) ou des situations expérimentales (3 facettes sur 127). Elles émergent toutes en marge d'une démarche de modélisation (figure 52).

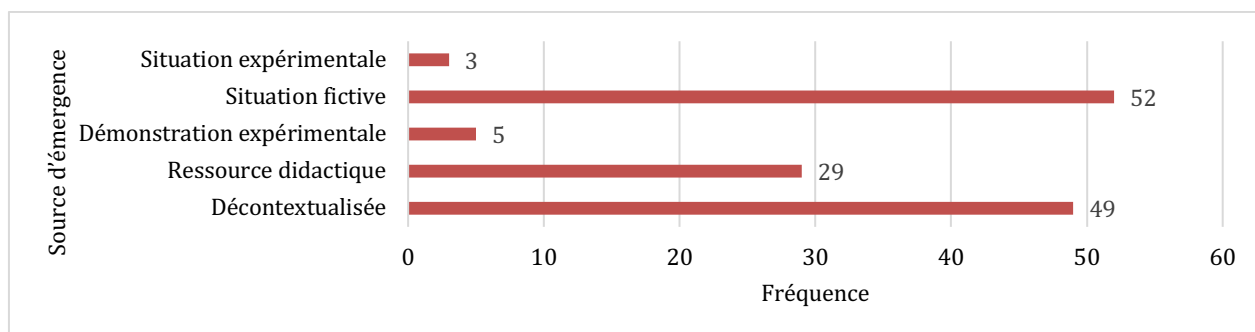


Figure 51- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1

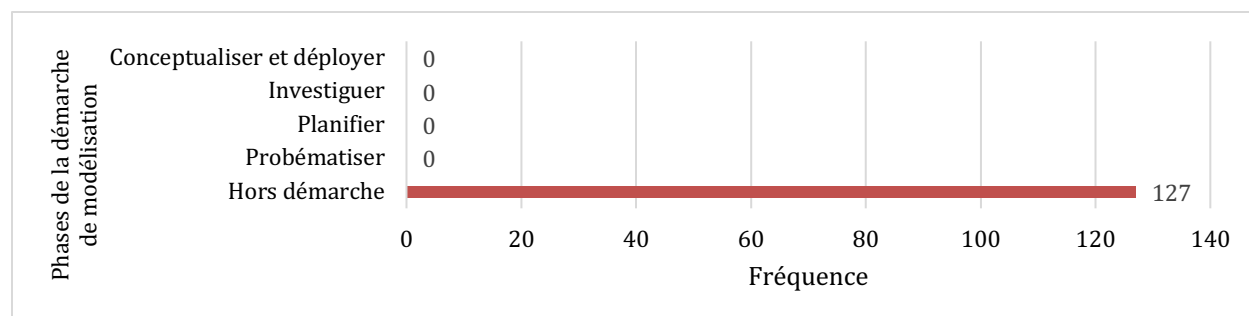


Figure 52- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

Les types de facettes VITESSE les plus fréquemment introduits dans la séquence sont de loin les facettes VITESSE-CONCEPTUELLES (77 facettes sur 127). Dans une moindre proportion, nous recensons les autres types de facettes telles que les facettes VITESSE-GRAPHIQUES (15 facettes sur 127), les facettes VITESSE-PROCÉDURALES (13 facettes sur 127) et les facettes Vitesse-algébriques (11 facettes sur 127) ([figure 53](#)).

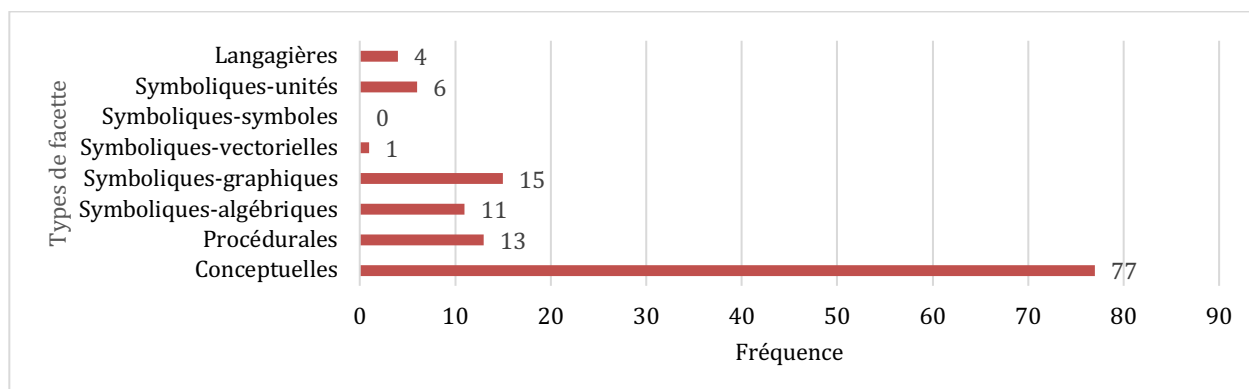


Figure 53- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon leurs types chez l'enseignante 1

Les facettes VITESSE sont essentiellement prises en charge par l'enseignante (86 facettes sur 127). Dans une moindre proportion, ces facettes sont prises en charge par les élèves seuls (27 facettes sur 127) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (14 facettes sur 127) (**figure 54**).

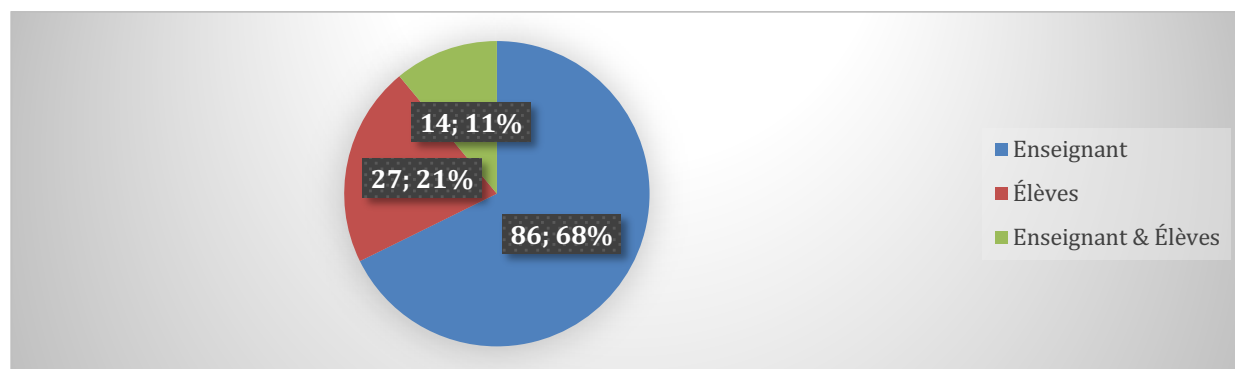


Figure 54- Distribution des facettes VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et vitesse moyenne) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1

Dix facettes de ce groupe présentent une continuité au-delà d'une continuité très faible. En effet, 7 facettes présentent une continuité faible (avec une fréquence d'apparition se situant entre 5 et 9 facettes sur la séquence), 2 une continuité moyenne (avec une fréquence d'apparition se situant entre 10 et 14) et 1 une continuité forte (avec une fréquence d'apparition se situant entre 15 et 19). Ces facettes, pour la plupart conceptuelles, portent sur le sens ou le signe de la vitesse, de la vitesse moyenne et de la vitesse instantanée, sur des procédures pour leur calcul, sur des objets mathématiques permettant de les identifier dans des graphiques, ou encore sur des formules qui leur sont associées (**annexe 19, tableaux 4 à 6**).

Les facettes conceptuelles visées sont la facette VITESSE MOYENNE-CONCEPTUELLE « La vitesse est le rapport entre la distance parcourue (ou le déplacement) et le temps écoulé » introduite 5 fois dans les séances 1 et 6 ; la facette VITESSE MOYENNE-CONCEPTUELLE « Un mobile qui se déplace dans le sens de la référence (vers la droite sur l'axe des  $x$ ) a une vitesse positive » introduite 5 fois dans la séance 2 ; la facette VITESSE INSTANTANÉE-CONCEPTUELLE « La vitesse instantanée (scalaire ou vectorielle) tient compte d'un  $\Delta t$  qui tend vers 0 » introduite 11 fois dans les séances 1, 2, 5, 7 et 11 ; la facette VITESSE INSTANTANÉE-CONCEPTUELLE « La vitesse instantanée (scalaire ou vectorielle) est la vitesse à un instant précis » introduite 10 fois dans les séances 1, 2, 7 et 11 ; la facette VITESSE MOYENNE-CONCEPTUELLE « La vitesse moyenne scalaire d'un mobile est le

rapport entre la distance parcourue et le temps écoulé » introduite 17 fois dans les séances 1, 2, 5, 7 et 11 et la facette VITESSE MOYENNE-CONCEPTUELLE « La vitesse moyenne (scalaire ou vectorielle) tient compte d'un  $\Delta t$  assez grand » introduite 5 fois dans les séances 2, 5 et 7.

Outre ces facettes conceptuelles, sont également en jeu la facette VITESSE INSTANTANÉE-PROCÉDURALE « On détermine la vitesse instantanée d'un mobile en faisant la pente du graphique position-temps entre deux instants très près » introduite 5 fois dans les séances 7, 10 et 11 ; la facette VITESSE MOYENNE-GRAPHIQUE « La pente du graphique du graphique position-temps donne la vitesse moyenne d'un mobile » introduite 5 fois dans les séances 7, 10 et 11 ; la facette VITESSE MOYENNE-ALGÈBRIQUE « La formule de la vitesse moyenne scalaire est  $d/\Delta t$  » introduite 6 fois dans les séances 1, 2, 7 et 10 ; et la facette VITESSE-UNITÉ « Les unités de mesure usuelles de la vitesse sont le m/s ou le km/h » introduite 6 fois dans les séances 2, 3, 7 et 11.

Les exemples suivants illustrent quelques facettes du groupe de facettes VITESSE en mettant en relation les tâches épistémiques qui les portent. Dans l'épisode 33 de la séance 5 dédiée à la prise de notes de cours théorique sur le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA), l'enseignante fait un retour sur les concepts de vitesse moyenne, de vitesse instantanée et d'accélération introduits à la première séance et les définit à nouveau. Dans cet épisode, elle définit et compare la vitesse moyenne avec la vitesse instantanée. Elle définit la première comme étant une variation de la position d'un mobile en fonction du temps sur une période de temps assez longue (avec un  $\Delta t$  assez grand) ou encore comme un rapport entre la distance totale parcourue et le temps pris par un mobile pour parcourir cette distance. Elle définit la seconde comme étant une variation de la position d'un mobile entre deux moments les plus rapprochés possible de l'instant désiré (avec un  $\Delta t$  très court, qui tend vers 0).

Dans l'épisode 48 de la séance 7 accordée au MRU, l'enseignante explique qu'en physique, l'expression vitesse employée seule se réfère généralement à la vitesse vectorielle, et plus particulièrement la vitesse vectorielle instantanée. Elle invite les élèves à définir et comparer les concepts de vitesse instantanée et de vitesse moyenne. Des définitions erronées de la vitesse instantanée (la vitesse instantanée est une vitesse qui se rapproche du 0, avec un  $\Delta t$  petit) et de la vitesse moyenne (la vitesse moyenne est une vitesse dont le  $\Delta t$  est plus grand) émises par un élève

sont évaluées négativement par l'enseignante et amènent celle-ci à solliciter les élèves pour qu'ils définissent et comparent ces concepts. À ce moment, une définition du concept de la vitesse moyenne (la vitesse moyenne est une vitesse prise pour la totalité d'un trajet) est fournie par un élève et évaluée positivement par l'enseignante, celle-ci la définit en comparant la vitesse instantanée avec la vitesse moyenne.

P : Une vitesse moyenne là on va considérer le trajet au complet, toute la distance parcourue divisée par tout le temps que ça a pris. Alors qu'une vitesse instantanée, c'est une vitesse pour un instant précis. (Enr séance 7, Ens 1)

Cette comparaison conduit l'enseignante à exemplifier une vitesse instantanée (vitesse indiquée par l'odomètre d'une voiture à un instant précis) et une vitesse moyenne (une automobile qui parcourt 200 km en 2 heures a une vitesse moyenne de 100 km/h), puis solliciter les élèves à évaluer et à argumenter sur l'appartenance d'un évènement à une vitesse instantanée (la vitesse d'une fusée mesurée sur une période de 2 heures), lequel est évalué négativement par deux élèves de la classe qui témoignent d'une faible compréhension du sens de la vitesse instantanée. Dès lors, l'enseignante compare et définit à nouveau les concepts de vitesse instantanée et de vitesse moyenne et explique qu'une vitesse peut être considérée comme une vitesse instantanée si la variation du temps est petite par rapport à la distance parcourue, ce qui est le cas pour l'évènement en question. Par la suite, l'enseignante sollicite les élèves à expliquer pourquoi on ne distingue pas la vitesse instantanée de la vitesse moyenne dans un MRU.

Dans l'épisode 53 de la séance 7 où l'enseignante interprète la variation de la position de la situation fictive d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (**figure 55**), elle sollicite les élèves à évaluer un argument sur une information (la possibilité de déduire une vitesse moyenne du graphique) qu'il est possible de déduire d'un graphique position-temps d'un mobile en MRUA. Mais l'absence de réponse de la part des élèves la conduit à définir la vitesse moyenne en tant que rapport entre la distance totale parcourue et le temps pris pour parcourir cette distance, puis à expliquer une procédure pour calculer la vitesse instantanée d'un mobile en MRUA dans un graphique position-temps. Enfin, elle exemplifie une vitesse instantanée en chimie : la vitesse de réaction.

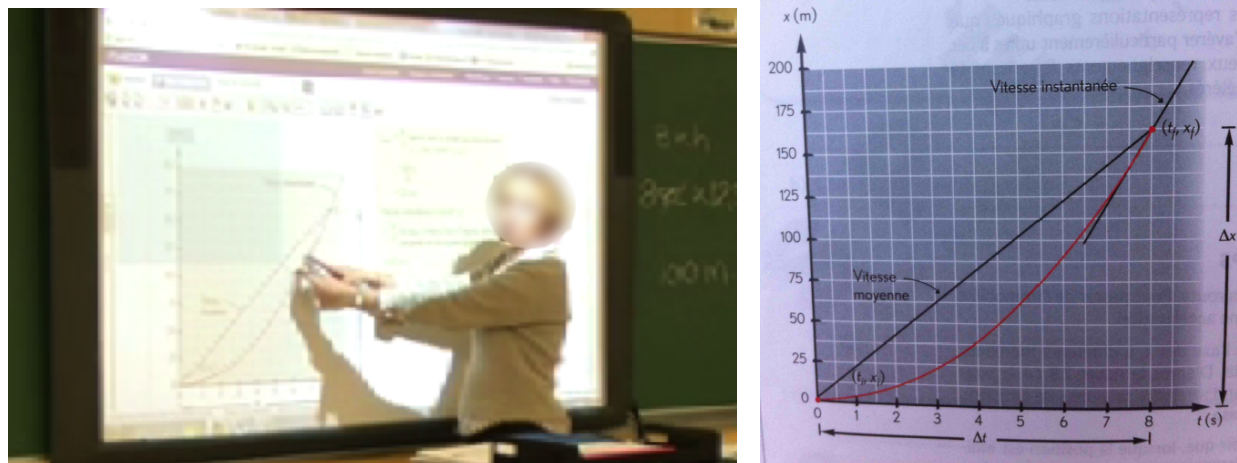


Figure 55- Interprétation de la variation de la position de la situation fictive d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7)

Enfin, dans l'épisode 71 de la séance 11 où l'enseignante expose des notes de cours sur l'analyse du mouvement de mobiles en MRU et en MRUA, après avoir défini la formule de la vitesse instantanée dans un MRUA ( $v_{inst} = \Delta s / \Delta t$ ), elle sollicite les élèves à décrire le temps dans une vitesse instantanée. La description (le temps est court) de la part des élèves est évaluée positivement par l'enseignante. Puis, elle définit la vitesse moyenne comme étant le rapport entre la distance parcourue et le temps pris pour parcourir cette distance et explique que la vitesse moyenne n'est pas équivalente à la moyenne des vitesses. Elle sollicite les élèves à évaluer un argument sur l'égalité entre la vitesse instantanée et la vitesse moyenne. Les élèves ne donnant pas suite à la sollicitation de l'enseignante, celle-ci définit et compare la vitesse instantanée avec la vitesse moyenne sur un graphique vitesse-temps élaboré précédemment en mettant en évidence les intervalles de temps considérés et en expliquant les procédures associées au calcul de ces vitesses dans ce graphique. Pour calculer la vitesse moyenne, il faut faire le rapport entre l'aire sous la courbe d'un graphique vitesse-temps et le temps total pris pour parcourir cette distance.

### 3.2.3.2 Groupe de facettes ACCÉLÉRATION (accélération, accélération instantanée et accélération moyenne)

Comme c'est le cas du groupe de facettes VITESSE, le groupe de facettes ACCÉLÉRATION est divisé en trois sous-groupes : accélération, accélération instantanée et accélération moyenne ([annexe 19, tableaux 9 à 11](#)). Vingt-neuf facettes sont distribuées dans ces 3 sous-groupes avec 20 facettes conceptuelles, 3 procédurales, 2 symboliques-algébriques, 1 symbolique-graphique, 1

symbolique-vectorielle, 1 symbolique-unité et 1 langagière. La fréquence d'apparition totale des facettes est de 142 facettes pour le sous-groupe ACCÉLÉRATION, 6 facettes pour le sous-groupe ACCÉLÉRATION INSTANTANÉE et 4 facettes pour le sous-groupe ACCÉLÉRATION MOYENNE. Globalement, la fréquence d'apparition totale du groupe de facettes ACCÉLÉRATION est de 152 facettes pour l'ensemble des séances ([annexe 19, tableau 12](#)).

Si les facettes ACCÉLÉRATION sont introduites dans un peu plus de la moitié des séances et dans tous les thèmes disciplinaires, c'est dans la séance 2 (N=80) qu'apparaissent davantage les facettes de ce groupe ([figure 56](#)). Outre leur fréquence d'apparition très importante dans le thème 1-Variables du mouvement (N=82), elles font également l'objet d'une introduction importante dans le thème 4-MRUA (N=50) et le thème 5-MRU et MRUA (N=18). Cependant, elles n'apparaissent qu'une seule fois dans le thème 2-vecteurs et le thème 3-MRU ([figure 57](#)).

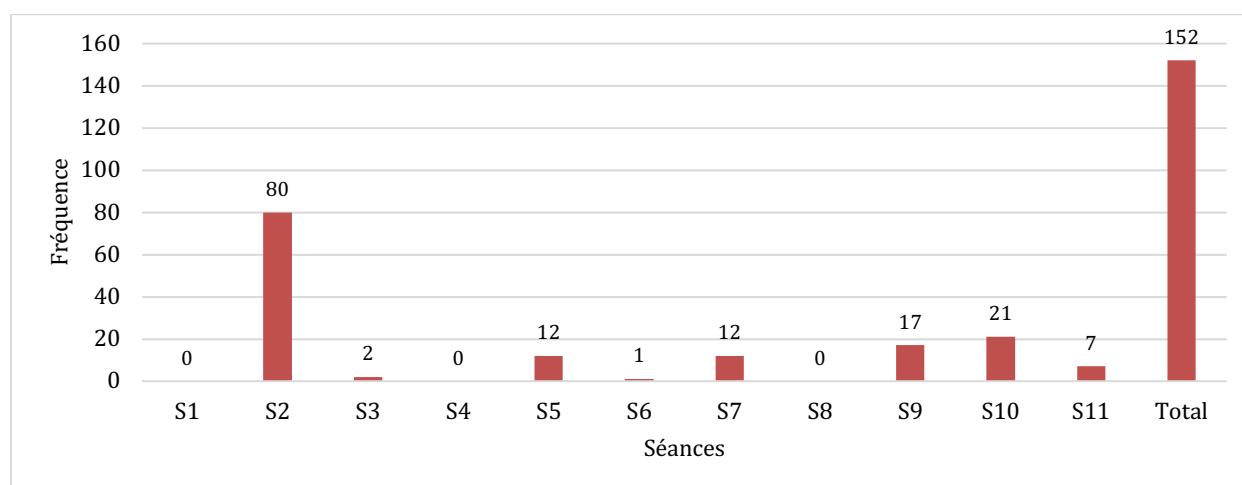


Figure 56- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon les séances chez l'enseignante 1

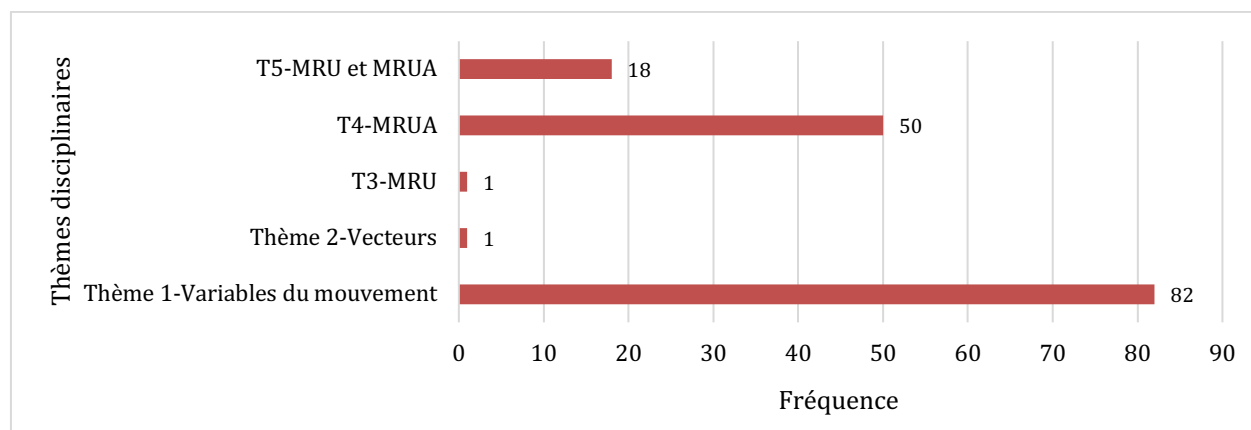


Figure 57- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

La densité des facettes ACCÉLÉRATION varie de façon importante selon les séances : elle est très faible pour les séances 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 11 (entre 0 et 9,6), faible pour les séances 9 et 10 ( $D=18,5$  et  $18,2$ ), mais elle très forte pour la séance 2 ( $D=66,7$ ) (**tableau 33**). Quant à la densité thématique, elle est très faible pour le thème 2-vecteurs ( $D=0,2$ ) et le thème 3-MRU ( $D=0,9$ ), mais elle faible pour le thème 5-MRU et MRUA ( $13,6$ ) et moyenne pour le thème 1- variables du mouvement ( $D=27,8$ ) et le thème 4-MRUA ( $D=21,3$ ) (**tableau 34**). Globalement, la densité moyenne des facettes ACCÉLÉRATION est de  $12,1$  au niveau de la séquence (**tableaux 33 et 34**).

Tableau 33 : Densité des facettes ACCÉLÉRATION selon les séances chez l'enseignante 1

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Densité moyenne
0	66.7	1.6	0	9.6	0.8	9.6	0	18.5	18.2	5.7	12.1

Tableau 34 : Densité des facettes ACCÉLÉRATION selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Thème 1 Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	Thème 3 MRU	Thème 4 MRUA	Thème 5 MRU et MRUA	Densité moyenne
27.8	0.2	0.9	21.3	13.6	12.1

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes Accélération sont presque toutes introduites dans les moments d'exercisation (89 facettes sur 152) et les moments de théorisation (62 facettes sur 152) (**figure 58**). Une seule fois, il y a introduction d'une facette ACCÉLÉRATION dans un moment d'explication du laboratoire.

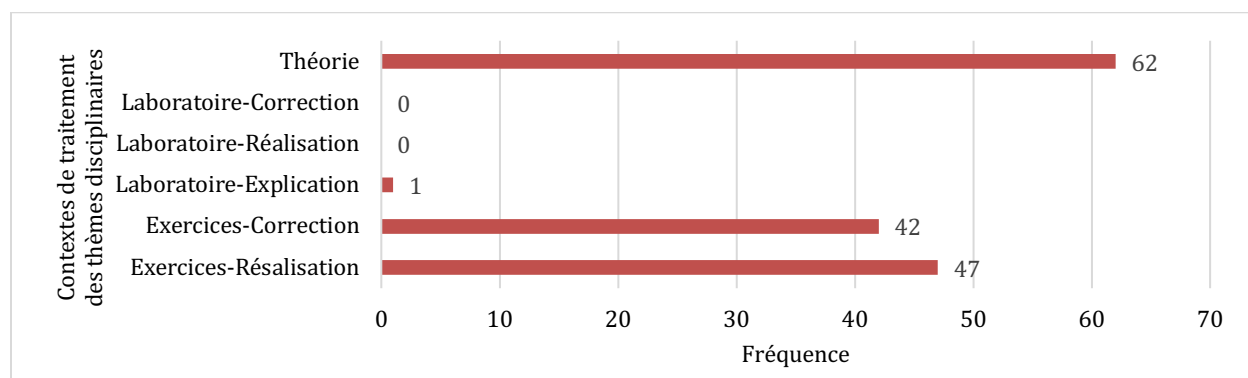


Figure 58- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1



Les facettes ACCÉLÉRATION sont essentiellement introduites dans des situations fictives (67 facettes sur 152), de manière décontextualisée (50 facettes sur 152) ou en s'appuyant sur des ressources didactiques (30 facettes sur 152). Seule une faible proportion de ce groupe de facettes est introduite dans des démonstrations expérimentales (12 facettes sur 152) et une seule dans une situation expérimentale (figure 59). Elles émergent toutes en marge d'une démarche de modélisation, sauf une seule qui émerge de la phase *Conceptualiser et déployer* d'une telle démarche (figure 60).

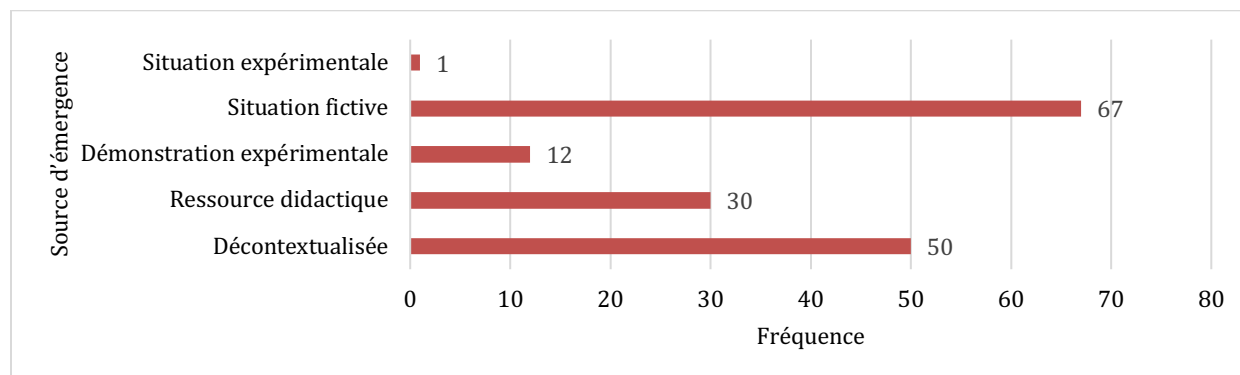


Figure 59- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1

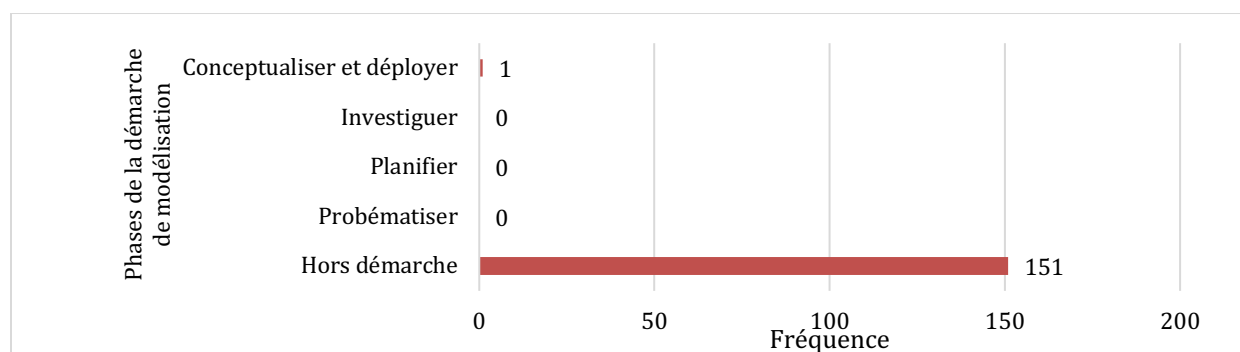


Figure 60- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

Les types de facettes ACCÉLÉRATION les plus fréquemment introduits dans la séquence sont de loin les facettes ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLES (99 facettes sur 152). Dans une moindre proportion, nous relevons d'autres autres types de facettes telles que les facettes ACCÉLÉRATION-PROCÉDURALES (16 facettes sur 152), les facettes ACCÉLÉRATION-ALGÈBRIQUES (15 facettes sur 152), les facettes ACCÉLÉRATION-GRAPHIQUES (11 facettes sur 152), et les autres types de facettes (figure 61).

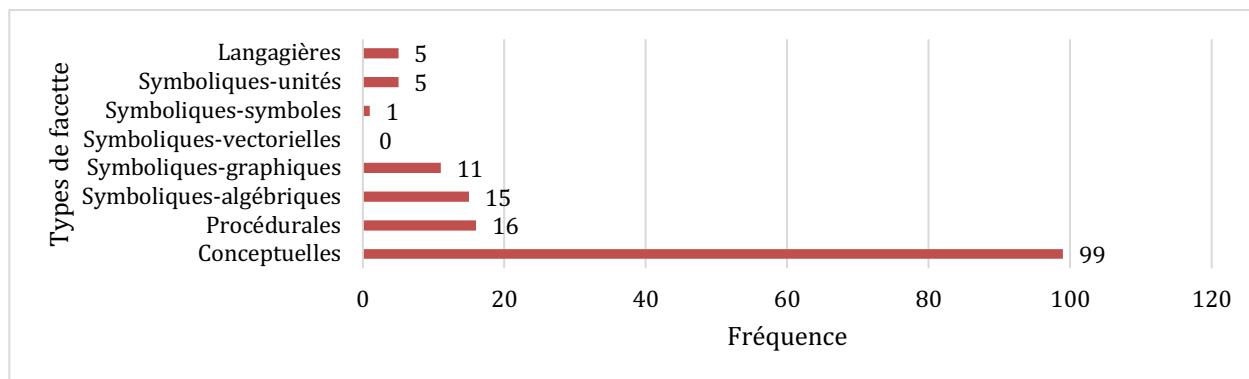


Figure 61- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon leurs types chez l'enseignante 1

Les facettes ACCÉLÉRATION sont essentiellement prises en charge par l'enseignante (95 facettes sur 152). Dans une moindre proportion, ces facettes sont prises en charge conjointement par l'enseignant et les élèves (31 facettes sur 152) ou par les élèves seuls (26 facettes sur 152) (**figure 62**).

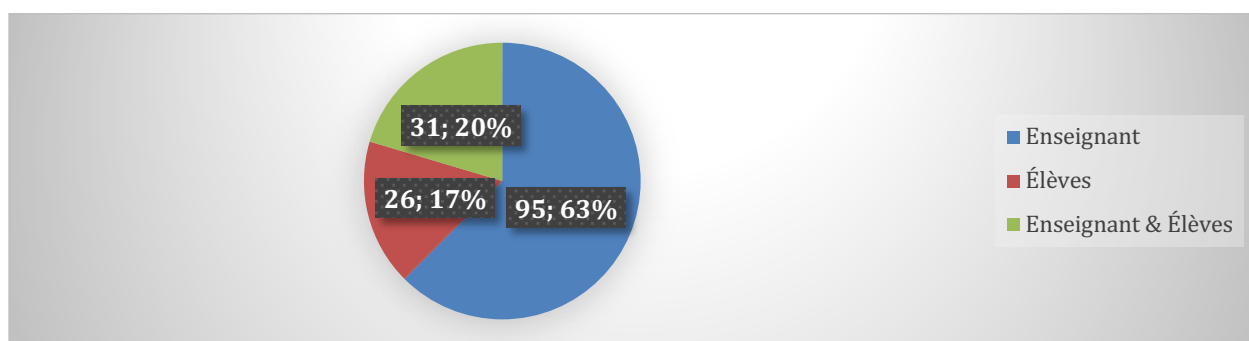


Figure 62- Distribution des facettes ACCÉLÉRATION selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1

Avec une fréquence d'apparition inférieure à 5 facettes sur la séquence, environ la moitié des facettes ACCÉLÉRATION ont une continuité très faible (**annexe 19, tableau 12**). Douze facettes de ce groupe se démarquent de ces dernières. En effet, 6 facettes présentent une continuité faible (avec une fréquence d'apparition se situant entre 5 et 9 facettes sur la séquence), 5 une continuité moyenne (avec une fréquence d'apparition se situant entre 10 et 14) et 1 une continuité forte (avec une fréquence d'apparition se situant entre 15 et 19). Ces facettes, pour la plupart conceptuelles, sont très diversifiées. Elles portent sur le sens, la grandeur et le signe de l'accélération, sur des relations mathématiques relatives à l'accélération, des représentations graphiques indiquant l'accélération, des procédures pour la calculer, des unités de mesure, ainsi que sur des aspects langagiers.

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « L'accélération scalaire est le rapport entre la variation de la vitesse scalaire et la variation du temps » introduite 7 fois dans les séances 2, 5 et 7 ; de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « L'accélération scalaire est constante si la variation de la vitesse scalaire est régulière » introduite 5 fois dans la séance 2 ; de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « L'accélération vectorielle est une variation dans la grandeur ou l'orientation de la vitesse » introduite 17 fois dans les séances 2 et 5 ; de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « Un mobile qui diminue sa vitesse dans le sens de la référence (vers la droite sur l'axe des  $x$ ) ou qui augmente sa vitesse dans le sens contraire de la référence (vers la gauche sur l'axe des  $x$ ) a une accélération négative » introduite 11 fois dans les séances 2, 6, 9, 10 et 11 ; de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « Un mobile qui diminue sa vitesse dans le sens de la référence (vers le haut sur l'axe des  $y$ ) ou qui augmente sa vitesse dans le sens contraire de la référence (vers le bas sur l'axe des  $y$ ) a une accélération négative » introduite 14 fois dans les séances 2, 7, 9, 10 et 11, de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « Un mobile dont la variation de la vitesse est positive a une accélération positive » introduite 5 fois dans la séance 2 ; et de la facette ACCÉLÉRATION-CONCEPTUELLE « Un mobile dont la variation de la vitesse est négative a une accélération négative » introduite 5 fois dans la séance 2.

Outre les facettes conceptuelles, nous retrouvons aussi la facette ACCÉLÉRATION-PROCÉDURALE « On détermine l'accélération d'un mobile en faisant la pente du graphique vitesse-temps » introduite 12 fois dans les séances 7, 9, 10 et 11 ; la facette ACCÉLÉRATION-ALGÈBRE « La formule de l'accélération scalaire est  $a = \Delta v / \Delta t$  » introduite 12 fois dans les séances 2, 5, 6, 7, 9 et 10 ; la facette ACCÉLÉRATION-GRAPHIQUE « Le taux de variation d'un graphique vitesse-temps donne l'accélération » introduite 11 fois dans les séances 7, 9 et 10, la facette ACCÉLÉRATION-UNITÉ « L'unité de mesure usuelle de l'accélération est le  $\text{m/s}^2$  » introduite 5 fois dans les séances 2, 3 et 11 ; et la facette ACCÉLÉRATION-LANGAGIÈRE « Dans le langage courant, l'accélération signifie une augmentation de la vitesse alors qu'en physique l'accélération inclut les situations où il y a diminution de la vitesse » introduite 5 fois dans la séance 2.

Les exemples suivants illustrent quelques facettes du groupe de facettes ACCÉLÉRATION en mettant en relation les tâches épistémiques qui les portent. Dans l'épisode 11 de la séance 2 dédié à un moment de théorisation sur l'accélération en grand groupe, l'enseignante 1 définit

l'accélération comme étant une variation de la vitesse ou de l'orientation. Pour ce faire, elle revient sur le concept de variation de vitesse abordé au cours précédent, en évoquant le symbolisme utilisé pour la description de la variation. En s'appuyant fortement sur la définition proposée dans le cahier d'apprentissage (**figure 63**), elle insiste auprès des élèves sur la nécessité de distinguer l'accélération dans le langage courant de l'accélération en physique qui englobe les événements où il y a augmentation et diminution de la vitesse.

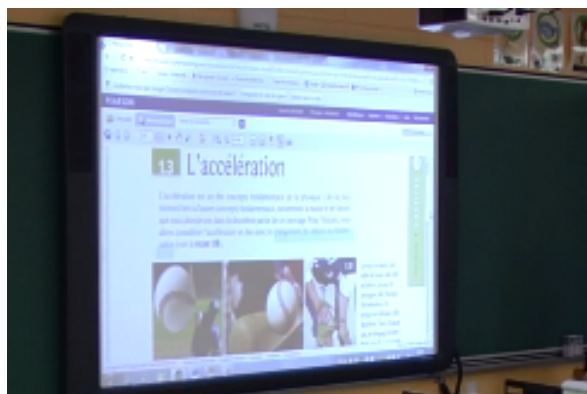


Figure 63- Définition de l'accélération en s'appuyant sur le cahier d'apprentissage (enseignante 1, séance 2)

Toujours en s'appuyant sur le cahier d'apprentissage, elle définit l'accélération vectorielle en tant que changement de vitesse vectorielle pendant une certaine période de temps ou, autrement dit, une variation de vitesse prenant en compte un déplacement et non une distance parcourue comme c'est le cas pour une accélération scalaire. Des situations fictives sont exposées par l'enseignante afin d'exemplifier le concept de vitesse vectorielle et la formule mathématique de l'accélération ( $a = \Delta v / \Delta t$ ) est introduite à l'intérieur de ces exemples. Un peu plus tard dans ce même épisode, l'enseignante s'appuie également sur le concept de variation de vitesse abordé à la séance 1 afin de construire la signification de l'accélération positive (accélération dont la variation de la vitesse est positive) et de l'accélération négative (accélération dont la variation de la vitesse est négative).

Dans l'épisode 13 de la séance 2, elle prend soin de théoriser le signe de l'accélération. Ce faisant, elle reprend, dans un premier temps, l'analyse des quatre situations fictives (A, B, C et D) de la séance 1 où il s'agissait de déterminer le signe du déplacement et de la variation de la vitesse d'une voiture qui se déplace sur un axe horizontal afin de construire la signification des

accélérations positive et négative. Elle précise notamment que le signe de l'accélération est toujours le même que celui de la variation de la vitesse, car le temps est positif (**figure 64**). De ce fait, elle sollicite les élèves à réinterpréter les signes d'accélération de ces quatre situations avec à l'appui des vitesses initiales et finales fictives.

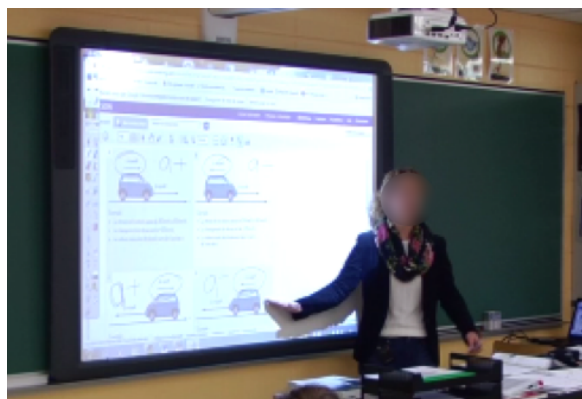


Figure 64- Construction de la signification des signes de l'accélération par les quatre situations fictives (enseignante 1, séance 2)

Par la suite, elle recourt à une démonstration expérimentale, comme elle l'a fait à la première séance, afin de construire la signification des signes de l'accélération en situation. À l'aide d'un charriot de laboratoire et d'une balle, elle construit les interprétations des accélérations positives et négatives sur les axes horizontal et vertical. Elle interprète un charriot qui augmente sa vitesse dans le sens contraire de référence (à gauche sur l'axe des x) (**figure 65**) ou une balle qui augmente sa vitesse dans le sens contraire de référence (une balle en chute libre par une accélération négative). Cette stratégie de rappel qui permet de caractériser le signe de l'accélération sur la base du signe de la variation de vitesse s'inscrit en cohérence avec celle proposée à la séance précédente.



Figure 65- Exemplification d'une accélération négative horizontale par une démonstration expérimentale (enseignante 1, séance 2)

Ce moment de théorisation est suivi d'un moment d'exercisation collectif à l'épisode 14 d'une durée approximative de 10 minutes dans lequel les facettes ACCÉLÉRATION sont mobilisées dans un nouveau contexte.

Dans l'épisode 52 de la séance 7 consacré au MRUA, les élèves sont appelés à effectuer une lecture individuelle de la théorie sur le MRUA dans le cahier d'apprentissage. C'est ce cahier qui se substitue à l'enseignante relativement à la prise en charge des tâches épistémiques. Le cahier d'apprentissage représente par un schéma position-temps et un graphique position-temps une situation fictive dans laquelle une voiture suit un MRUA : la variation de sa position augmente de façon régulière entre les instants 0 et 8 s sur une distance de 160 m (figure 66).

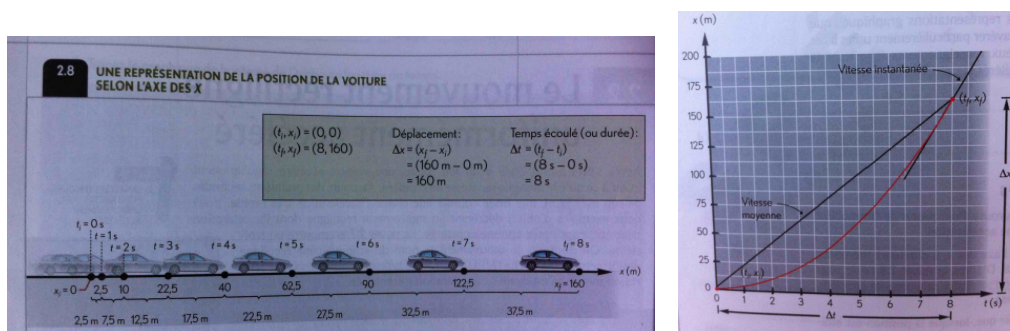


Figure 66- Représentation de l'évolution de la position d'une voiture en MRUA selon le temps par le cahier d'apprentissage (enseignante 1, séance 7)

Le cahier d'apprentissage interprète le tracé du graphique position-temps qui correspond à une demi-parabole verticale et croissante et où la vitesse d'une voiture augmente dans le sens de l'axe de la position ( $\Delta v$  positif) par une accélération positive. Puis, il interprète le tracé du graphique position-temps qui correspond à une demi-parabole horizontale<sup>108</sup> et croissante la vitesse et où la vitesse d'une voiture diminue ( $\Delta v$  négatif) dans le sens de l'axe de la position par une accélération négative (figure 67).

<sup>108</sup> Parabole dont la courbe est ouverte sur l'axe des  $x$ .

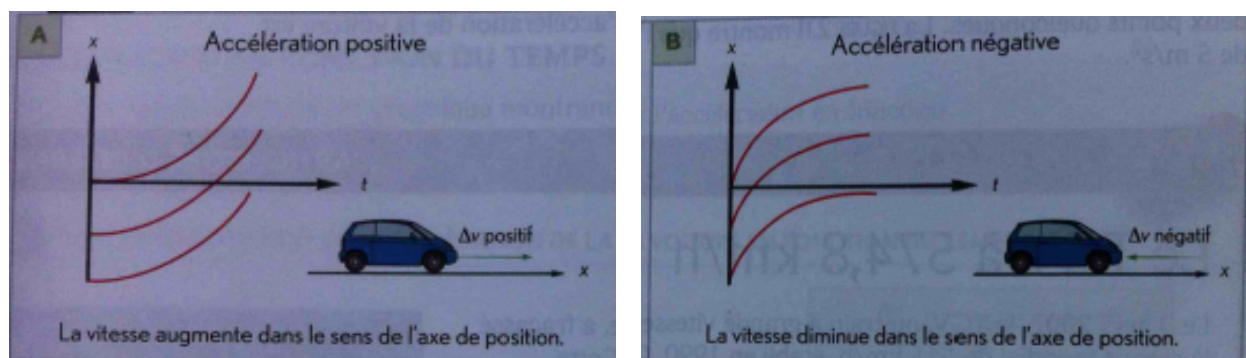


Figure 67- Interprétation du signe de l'accélération d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7)

Il interprète le tracé du graphique position-temps correspondant à une demi-parabole horizontale et décroissante par une accélération positive et où la vitesse d'une voiture diminue ( $\Delta v$  positif) dans le sens inverse de l'axe de la position par une accélération positive. Puis, il interprète le tracé du graphique position-temps qui correspond à une demi-parabole verticale<sup>109</sup> et décroissante et où la vitesse d'une voiture augmente dans le sens inverse de l'axe de la position ( $\Delta v$  négatif) par une accélération négative (figure 68).

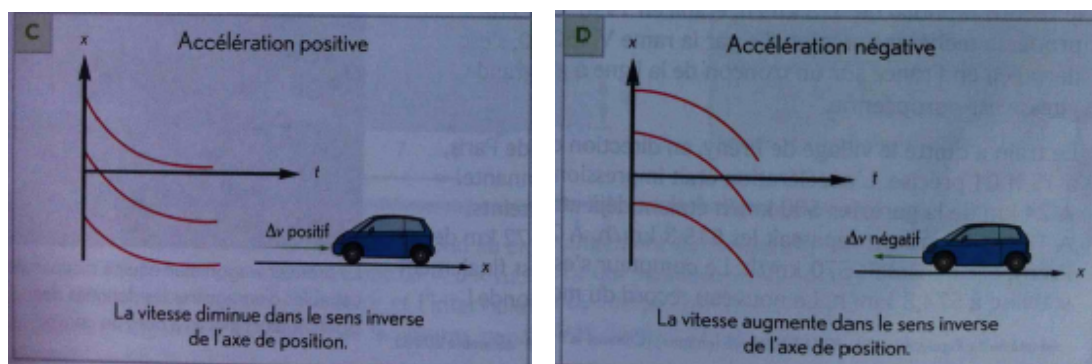


Figure 68- Interprétation du signe de l'accélération d'une voiture en MRUA à partir d'un graphique position-temps (enseignante 1, séance 7)

Un peu plus loin dans cet épisode, l'enseignante sollicite les élèves à déduire une information du graphique vitesse-temps (variation de la vitesse) de cette même voiture. Un élève en déduit l'accélération, laquelle est évaluée positivement par l'enseignante et explique que le taux de variation du tracé du graphique vitesse-temps correspond à l'accélération du mobile. Ainsi, elle explique la procédure pour construire un graphique accélération-temps d'un mobile en MRUA à

<sup>109</sup> Parabole dont la courbe est ouverte sur l'axe des  $y$ .



partir de son graphique vitesse-temps : calculer la pente du graphique vitesse-temps du mobile (**figure 69**).

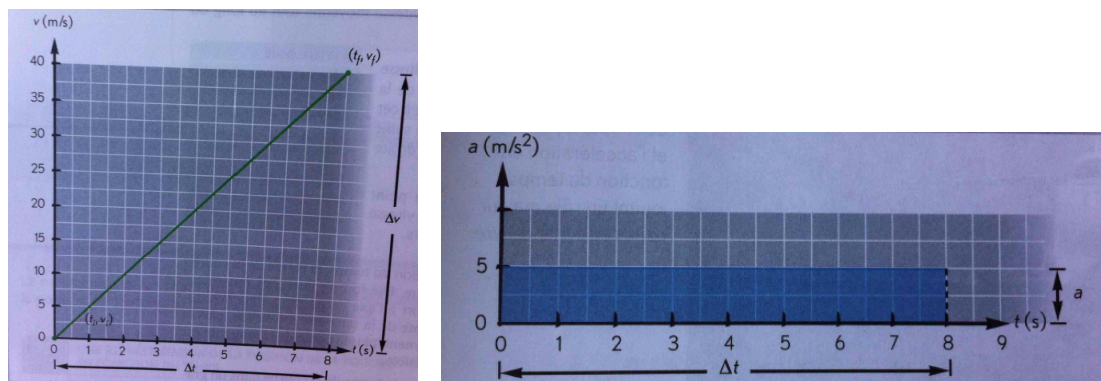


Figure 69- Explication de la procédure pour construire un graphique accélération-temps d'un mobile en MRUA à partir de son graphique vitesse-temps (enseignante 1, séance 7)

L'analyse de ce graphique vitesse-temps conduit l'enseignante à définir une accélération en tant que rapport entre une variation de vitesse et une variation de temps et à déduire la formule de l'accélération à partir du taux de variation du tracé d'un graphique vitesse-temps.

Dans l'épisode 63 de la séance 10, un élève de la classe demande à l'enseignante d'expliquer le concept d'accélération négative. Dès lors, l'enseignante recourt à une démonstration expérimentale avec le charriot de laboratoire pour exemplifier deux événements dans lesquels l'accélération est négative à l'échelle horizontale (**figure 70**). Puis, elle exemplifie également deux événements dans lesquels l'accélération est négative à l'échelle verticale (**figure 71**). Ces démonstrations s'inscrivent dans la continuité avec les démonstrations sur la variation de la vitesse effectuées dans les séances précédentes 1, 2 et 9.



Figure 70- Exemplification de deux événements par une démonstration expérimentale impliquant des accélérations négatives horizontales (enseignante 1, séance 10)



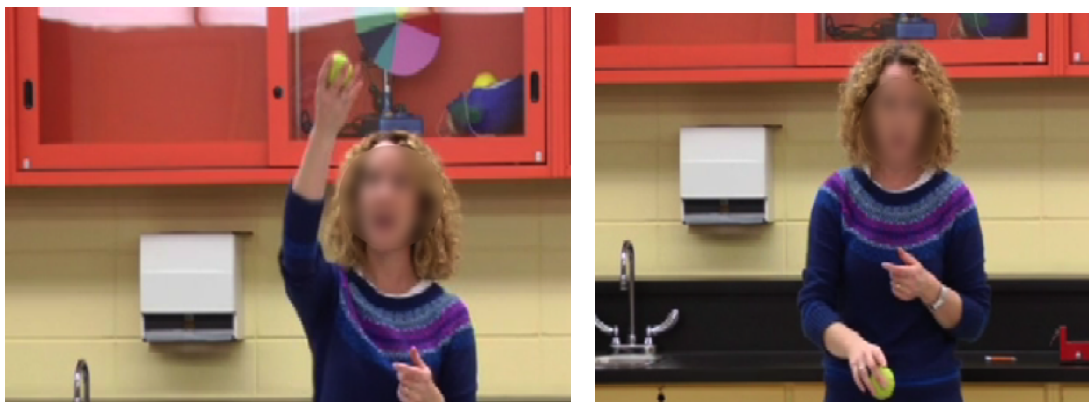


Figure 71- Exemplification de deux évènements par une démonstration expérimentale impliquant des accélérations négatives verticales (enseignante 1, séance 10)

### 3.2.3.3 Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU)

Le groupe de facettes MRU est constitué de 27 facettes avec 9 facettes conceptuelles, 1 procédurale, 1 symbolique-algébrique, 15 symbolique-graphique et 1 symbolique-symbole avec une fréquence d'apparition totale de 92 facettes pour l'ensemble des séances ([annexe 19, tableau 14](#)).

Les facettes MRU sont introduites dans moins de la moitié des séances, et plus particulièrement dans la deuxième moitié de la séquence, soit dans les séances 5, 7, 10 et 11 ([figure 72](#)). Ce sont dans la séance 7 (N=30) et la séance 11 (N=28) que l'introduction de ce groupe de facettes est la plus élevée (figure 124). Dans le thème 3-MRU, la fréquence d'apparition des facettes MRU est élevée (N=56), ce qui indique que la cohérence thématique du savoir est bien assurée. Le thème 4-MRUA (N=29) est aussi particulièrement riche en termes des facettes de ce groupe ([figure 73](#)).

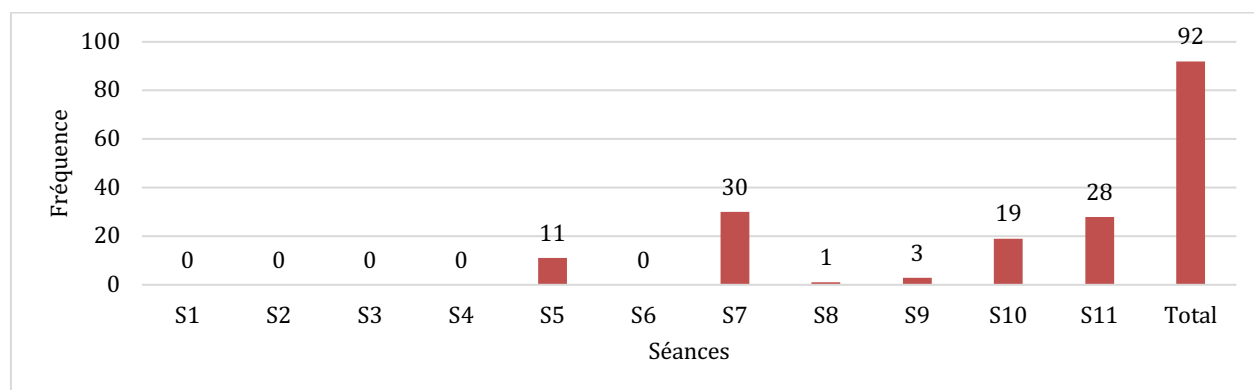


Figure 72- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les séances chez l'enseignante 1

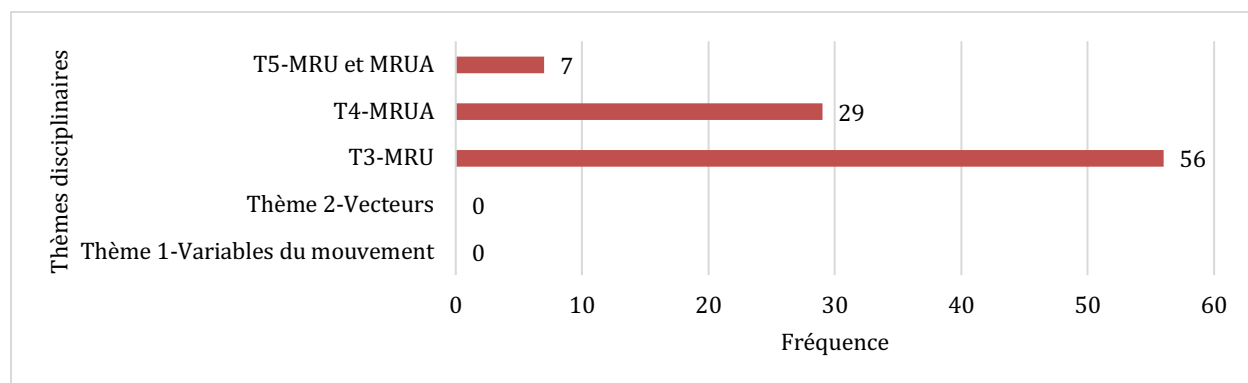


Figure 73- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

La densité des facettes MRU selon les séances est donc relativement très faible dans la plupart des séances (séances 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 9 où elle varie entre 0 et 3,1) et faible dans la séance 10 ( $D=16,5$ ). Cependant, la densité est moyenne dans la séance 11 ( $D=23$ ) ([tableau 33](#)). Quant à la densité thématique, elle est très faible ou faible pour tous les thèmes disciplinaires, sauf pour le thème 3-MRU où elle est très forte ( $D=51,9$ ) ([tableau 34](#)). Globalement, la densité moyenne des facettes MRU est de 7,3 au niveau de la séquence ([tableaux 33 et 34](#)).

Tableau 35 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les séances chez l'enseignante 1

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Densité moyenne
0	0	0	0	0,8	0	24	1.2	3.1	16.5	23	7.3

Tableau 36 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Thème 1 Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	Thème 3 MRU	Thème 4 MRUA	Thème 5 MRU et MRUA	Densité moyenne
0	0	51.9	12.4	5.3	7.3

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes MRU se déploient presque toutes dans des moments de théorisation (88 facettes sur 92) et, dans une moindre proportion, dans des moments d'exercisation (4 facettes sur 92). Aucune des facettes de ce groupe n'est introduite dans les laboratoires ([figure 74](#)).

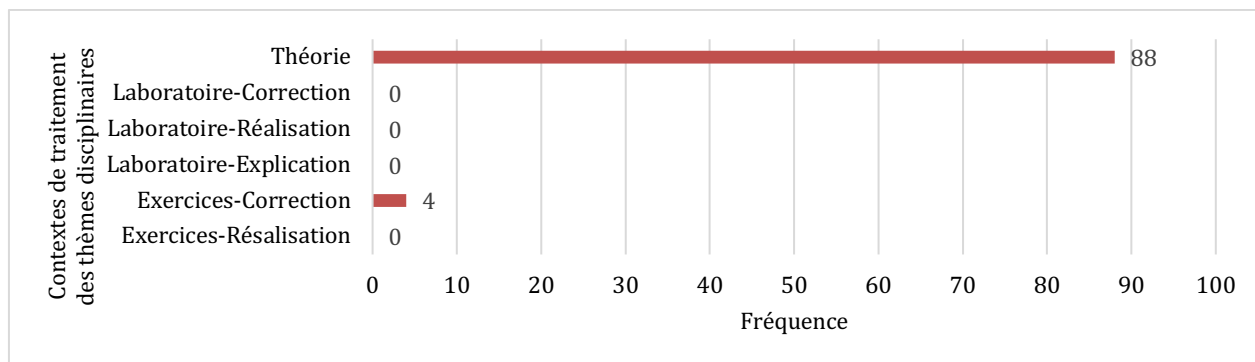


Figure 74- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Les facettes MRU sont essentiellement introduites, dans des proportions égales, dans des situations fictives (39 facettes sur 92) ou de manière décontextualisée (39 facettes sur 92). Dans une moindre proportion, elles sont introduites en s'appuyant sur des ressources didactiques (7 facettes sur 58) (**figure 75**). Seule une facette de ce groupe est introduite dans une démonstration expérimentale, et de même, dans une situation expérimentale. Toutes les facettes de ce groupe émergent en dehors d'une démarche de modélisation (**figure 76**).

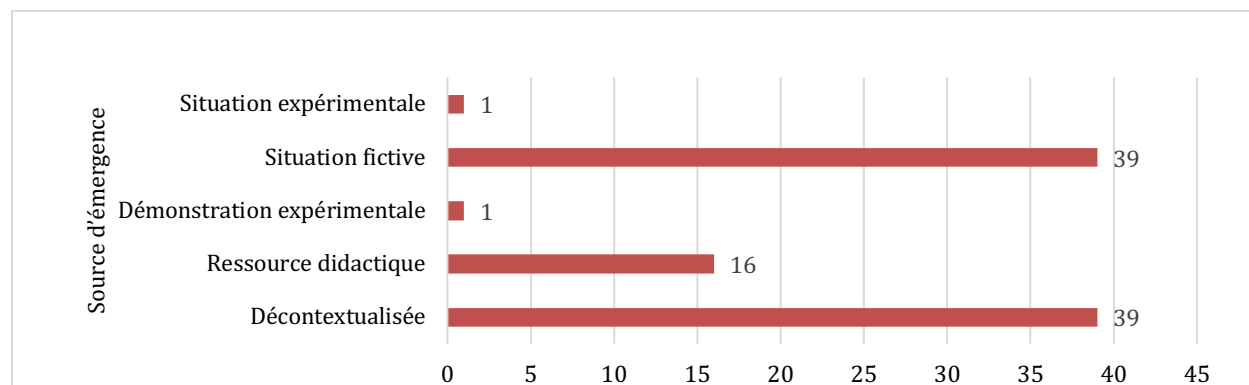


Figure 75- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1

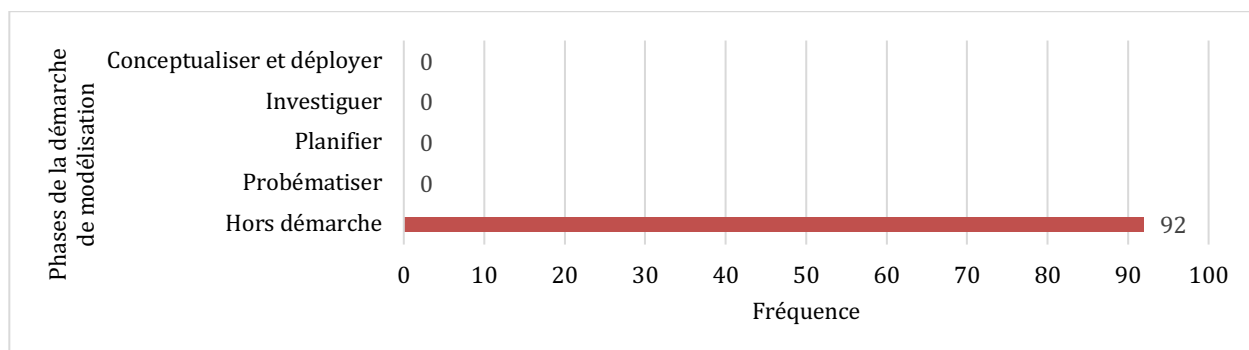


Figure 76- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

Les types de facettes MRU les plus fréquemment introduits dans la séquence sont les facettes MRU-CONCEPTUELLES (44 facettes sur 92) et les facettes MRU-GRAPHIQUES (41 facettes sur 92) (**figure 77**). Nous dénombrons seulement 4 facettes MRU-SYMBOLES et 3 facettes MRU-ALGÈBRIQUES.

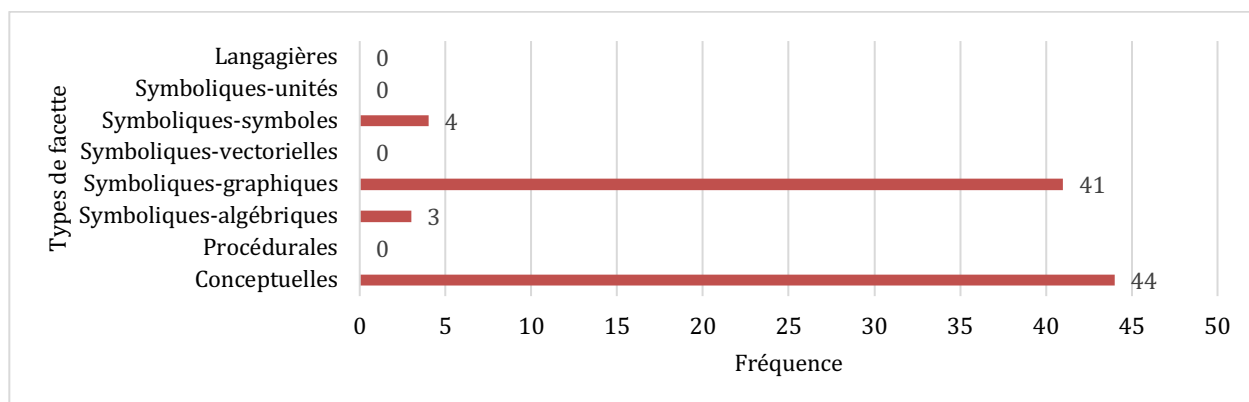


Figure 77- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon leurs types chez l'enseignante 1

Les facettes MRU sont essentiellement prises en charge par l'enseignante (55 facettes sur 92). Dans une moindre proportion, elles le sont conjointement par l'enseignant et les élèves (18 facettes sur 92) ou par les élèves seuls (19 facettes sur 92) (**figure 78**).

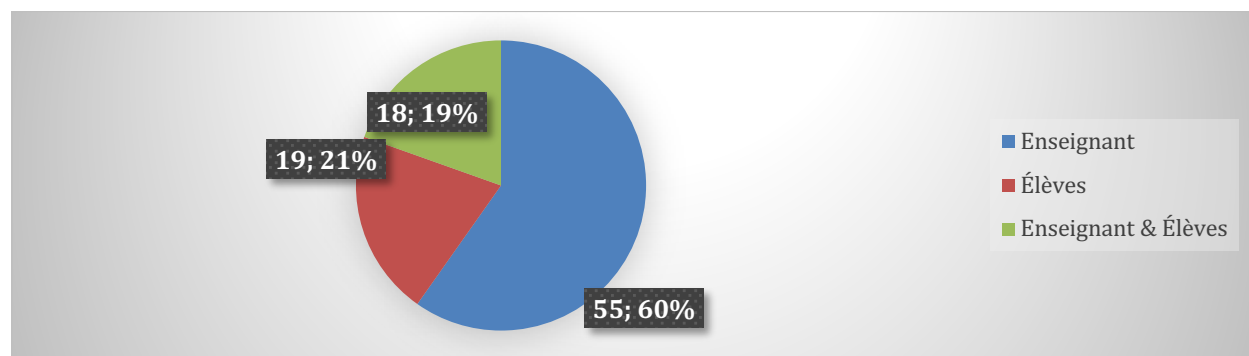


Figure 78- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1

La majorité des facettes MRU a une continuité très faible. D'autres facettes se démarquent de celles-ci. Quatre facettes de ce groupe ont une continuité faible (avec une fréquence d'apparition se situant entre 5 et 9 facettes sur la séquence) et une de ce groupe a une continuité forte (avec une fréquence d'apparition se situant entre 15 et 19) (**annexe 19, tableau 14**). Ces facettes sont des facettes conceptuelles ou graphiques et portent sur la grandeur de la vitesse d'un mobile en MRU,

sur la description du tracé ou sur la nature de la relation des graphiques vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU.

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la FACETTE MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, la grandeur de la vitesse est constante dans le temps » introduite 19 fois dans les séances 5, 7, 9, 10 et 11 et de la facette MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, la vitesse moyenne est égale à la vitesse instantanée en tout temps » introduite 6 fois dans les séances 5, 7 et 11.

Pour les facettes graphiques, il s'agit de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique position-temps d'un mobile en MRU est une fonction linéaire » introduite 6 fois dans les séances 7, 8, 10 et 11 ; de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique vitesse-temps d'un mobile en MRU est une droite horizontale » introduite 8 fois dans les séances 7, 10 et 11 ; et de la FACETTE MRU-GRAPHIQUE « Le graphique accélération-temps d'un objet en MRU est une droite horizontale nulle » introduite 6 fois dans les séances 9, 10 et 11.

Les exemples suivants illustrent quelques facettes du groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) en mettant en relation les tâches épistémiques qui les sous-tendent. Dans l'épisode 32 de la séance 5, l'enseignante définit le MRU comme étant un mouvement dans lequel la position varie de façon uniforme et la vitesse est constante dans le temps. Après avoir exemplifié le mouvement d'un mobile en MRU et défini la formule de la vitesse dans un MRU ( $v = d/t$ ), elle sollicite un élève à argumenter sur la non-nécessité de distinguer la vitesse moyenne de la vitesse instantanée dans ce type de mouvement, car ces vitesses sont égales (dans un MRU on ne distingue pas la vitesse moyenne de la vitesse instantanée, car la vitesse est constante) émise de la part d'un élève qui est évaluée positivement par l'enseignante qui à son tour explique que dans un MRU la vitesse moyenne est égale à la vitesse instantanée.

Dans l'épisode 64 de la séance 10 consacré à de la théorie sur le MRUA, l'enseignante sollicite les élèves à définir et comparer un mouvement uniforme avec un mouvement accéléré. Les élèves de la classe ne donnant pas suite à la sollicitation de l'enseignante, l'enseignante définit et compare le mouvement uniforme avec le mouvement accéléré uniforme : le mouvement uniforme est un mouvement dans lequel la vitesse du mobile est toujours la même, alors que le

mouvement accéléré est un mouvement dans lequel la vitesse du mobile est variable, c'est-à-dire un mouvement dans lequel la voiture accélère ou décélère. Pour illustrer cette comparaison entre ces mouvements uniforme et accéléré, l'enseignante utilise des animations vidéos permettant de simuler le mouvement d'une voiture en MRU et en MRUA. Elle engage les élèves dans une analyse collective du mouvement de cette voiture par les graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps qui leur sont associés. Lors de l'analyse du graphique accélération-temps d'un mobile en MRU, elle active une animation vidéo qui présente de façon simultanée le mouvement de cette voiture et la construction de son graphique accélération-temps. Au même moment, elle sollicite les élèves à prédire le tracé du graphique accélération-temps d'une voiture en MRU qui se déplace dans le sens de référence sur l'axe des  $x$ . Mais cette prédiction sollicitée de manière vague par l'enseignante (« on s'attend à quoi du graphique accélération-temps de cette voiture ? ») entraîne plusieurs élèves de la classe à faire des prédictions vagues ou erronées (ex. : « C'est nul. Il n'y a pas d'accélération »), lesquelles sont évaluées positivement par l'enseignante. Dès lors, l'enseignante simule les données accélération-temps de la voiture en activant l'animation, représente le graphique accélération-temps de la voiture (relation constante nulle et droite horizontale nulle) et décrit l'accélération de la voiture par une accélération nulle (**figure 79**).



Figure 79- Représentation et description de l'accélération d'une voiture en MRU dans le sens de référence par une relation nulle (droite horizontale nulle) (enseignante 1, séance 10)

Dans l'épisode 68 de la séance 11, l'enseignante sollicite les élèves à définir ce qu'est un MRU. Les définitions du MRU faites par les élèves demeurent vagues, tautologiques ou partielles (« un mouvement que c'est tout le temps pareil », « un mouvement rectiligne », « un mouvement à vitesse constante », même si ce concept a été abordé dans les séances précédentes. Cela conduit l'enseignante à définir le MRU comme étant un mouvement en ligne droite, et à solliciter les élèves à évaluer un argument sur la variation de la position d'un mobile en MRU (est-ce qu'il y a variation

de la position dans un MRU ?) et un argument sur les signes possibles de position (la position peut-elle être positive ou négative ?), lesquels sont évalués positivement par les élèves. L'enseignante en déduit qu'il y a une variation de la position dans un MRU du fait que le mobile avance, mais que la vitesse est constante en raison de la variation de la position qui est régulière. Ensuite, comme elle l'a fait lors de l'épisode 64 de la séance 10, elle sollicite les élèves à prédire le tracé du graphique position-temps d'un MRU. Mais les descriptions partielles ou erronées du tracé du graphique position-temps d'un mobile en MRU faites par les élèves (« une ligne droite », « une ligne droite horizontale ») sont évaluées négativement par l'enseignante. Dès lors, l'enseignante sollicite les élèves à évaluer à nouveau un argument sur la variation de la position d'un mobile en MRU (est-ce que le mobile garde toujours la même position ?), lequel est évalué négativement par un élève qui décrit le tracé de ce graphique par une droite oblique de pente positive en faisant un geste avec son crayon. Après avoir évalué positivement cette description, l'enseignante représente le tracé du graphique position-temps d'un mobile en MRU qui se déplace dans le sens de référence par une droite oblique de pente positive et interprète un mobile en MRU qui se déplace dans le sens contraire de référence par une droite oblique de pente négative. Puis, elle décrit la relation mathématique (relation linéaire) associée à un MRU. De même, l'enseignante sollicite les élèves à prédire le tracé du graphique vitesse-temps d'un MRU. Mais la description partielle du tracé du graphique vitesse-temps d'un mobile en MRU faite par un élève (« une droite ») conduit l'enseignante à solliciter les élèves à décrire la variation de la vitesse dans un MRU, laquelle est décrite (la vitesse est constante dans un MRU) et évaluée positivement par l'enseignante. Dès lors, l'enseignante en déduit que le tracé du graphique vitesse-temps d'un MRU est une droite horizontale de valeur quelconque et représente ce tracé dans le référentiel. De même, l'enseignante sollicite les élèves à prédire le tracé du graphique accélération-temps d'un MRU. La description partielle de ce graphique faite par un élève (« Moi j'aurais dit droite aussi comme la vitesse ») est évaluée négativement par l'enseignante et conduit celle-ci à argumenter sur cette description, et à solliciter l'élève à décrire l'allure de la droite dans le référentiel (« Droite aussi sauf qu'elle ne peut pas être n'importe où. Elle est droite, mais elle peut être à une seule place. Laquelle ? »). Une fois la description de l'élève (« elle est à zéro ») évaluée positivement par l'enseignante, celle-ci représente le tracé du graphique accélération-temps d'un mobile en MRU par une droite horizontale nulle dans le référentiel. En guise de synthèse, l'enseignante décrit, en les pointant, les trois graphiques du MRU : le tracé du graphique position-temps par une droite oblique de pente positive,

le tracé du graphique vitesse-temps par une droite horizontale de valeur positive et le tracé du graphique accélération-temps par une droite horizontale de valeur nulle (**figure 80**).

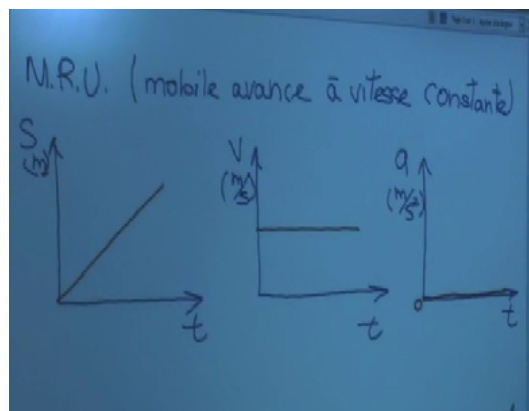


Figure 80- Description des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU dans le sens de référence (enseignante 1, séance 11)

En s'appuyant sur ces représentations, elle interprète les tracés des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps de ce même mobile en MRU, mais qui se déplace dans le sens contraire de la référence respectivement par les tracés suivants : une droite oblique de pente négative, une droite horizontale de valeur négative et une droite horizontale de valeur nulle.

#### 3.2.3.4 Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA)

Le groupe de facettes MRUA est constitué d'un nombre important de facettes, soit 49 facettes dont 17 conceptuelles, 14 symboliques-algébriques, 17 symboliques-graphiques et 1 symbolique-symbole, avec une fréquence d'apparition totale de 117 facettes pour l'ensemble des séances (**annexe 19, tableau 15**).

Comme c'est le cas des facettes MRU, les facettes MRUA sont introduites dans moins de la moitié des séances, et plus particulièrement dans la deuxième moitié de la séquence, soit dans les séances 5, 7, 9, 10 et 11 (**figure 81**). Ce sont dans la séance 10 (N=54) et la séance 11 (N=40) que l'introduction de ce groupe de facettes est la plus élevée. Dans le thème 4-MRUA, la fréquence d'apparition des facettes MRUA est élevée (N=85), ce qui indique que la cohérence thématique du savoir est bien assurée. Le thème 5-MRU et MRUA (N=27) est aussi particulièrement riche en regard des facettes de ce groupe (**figure 82**).



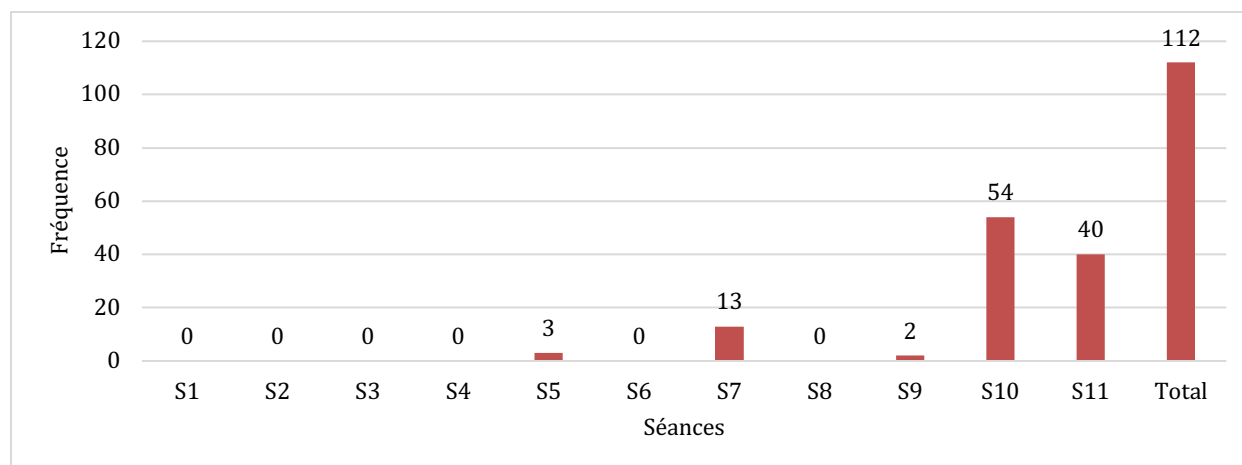


Figure 81- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les séances chez l'enseignante 1

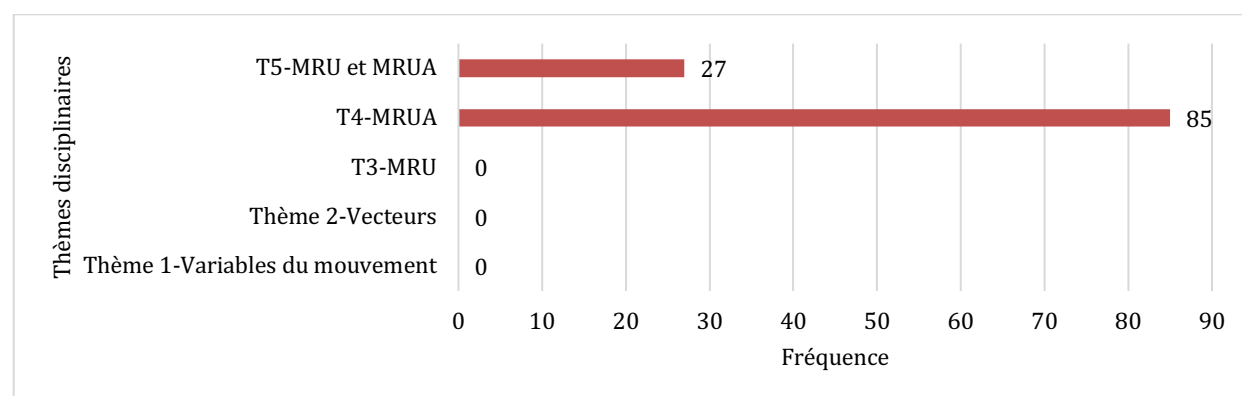


Figure 82- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

La densité des facettes MRUA selon les séances est donc relativement très faible dans la plupart des séances (séances 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 et 9 où elle varie entre 0 et 2,4) et faible dans la séance 7 ( $D=10,4$ ). Cependant, cette densité est forte dans la séance 11 ( $D=32,8$ ) et très forte dans la séance 10 ( $D=47$ ) ([tableau 37](#)). Quant à la densité thématique, elle est très faible dans les thèmes disciplinaires 1, 2 et 3, mais elle est moyenne pour le thème 5-MRU et MRUA ( $D=20,5$ ) et forte pour le thème 4-MRUA ( $D=36,1$ ) ([tableau 38](#)). Globalement, la densité moyenne des facettes MRUA est de 8,9 au niveau de la séquence ([tableau 37 et 38](#)).

Tableau 37 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les séances chez l'enseignante 1

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	Densité moyenne
0	0	0	0	2.4	0	12	0	2.2	47	32.8	9.3

Tableau 38 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Thème 1 Variables du mouvement	Thème 2 Vecteurs	Thème 3 MRU	Thème 4 MRUA	Thème 5 MRU et MRUA	Densité moyenne
0	1	0	36.1	20.5	9.3

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes MRUA se déploient presque toutes dans des moments de théorisation (100 facettes sur 112), et dans une moindre proportion, dans des moments d'exercisation (10 facettes sur 112) ([figure 83](#)). Seules deux facettes de ce groupe sont introduites dans les laboratoires lors des explications ou de la correction du laboratoire.

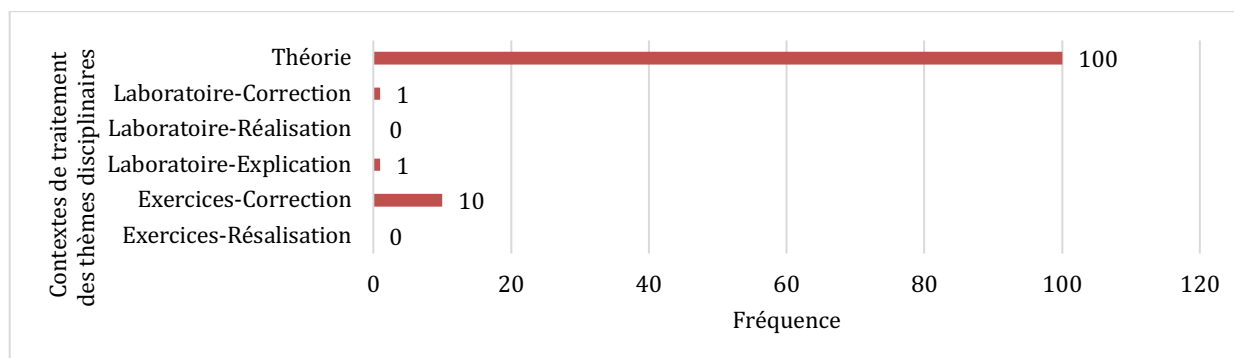


Figure 83- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignante 1

Les facettes MRUA sont essentiellement introduites en s'appuyant sur des ressources didactiques (52 facettes sur 112) ou encore, elles se déploient dans des situations fictives (41 facettes sur 112) ou de manière décontextualisée (28 facettes sur 112) ([figure 84](#)). Dans une moindre proportion, elles sont introduites dans des démonstrations expérimentales (N=7). Une seule est introduite en situation expérimentale. Toutes les facettes de ce groupe émergent en dehors d'une démarche de modélisation, sauf une seule qui est déployée dans la phase *conceptualiser et déployer* d'une telle démarche ([figure 85](#)).

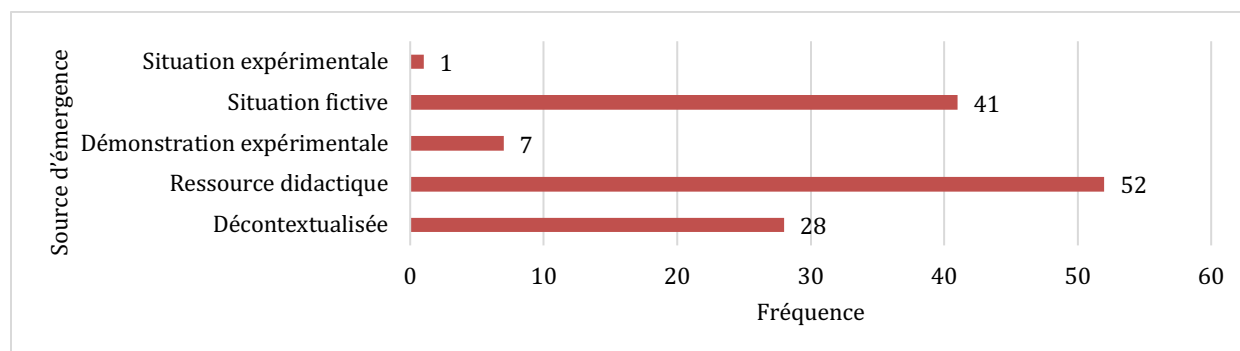


Figure 84- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignante 1

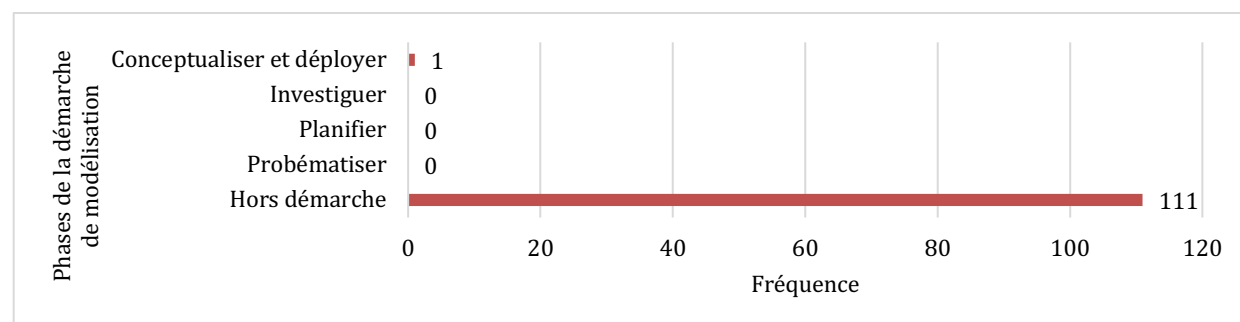


Figure 85- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignante 1

Les types de facettes MRUA qui prédominent sont les facettes MRUA-ALGÈBRIQUES (41 facettes sur 112), suivis des facettes MRUA-GRAPHIQUES (34 facettes sur 112) et MRUA-CONCEPTUELLES (32 facettes sur 112) ([figure 86](#)). Nous dénombrons par ailleurs 5 facettes MRUA-SYMBOLIQUES.

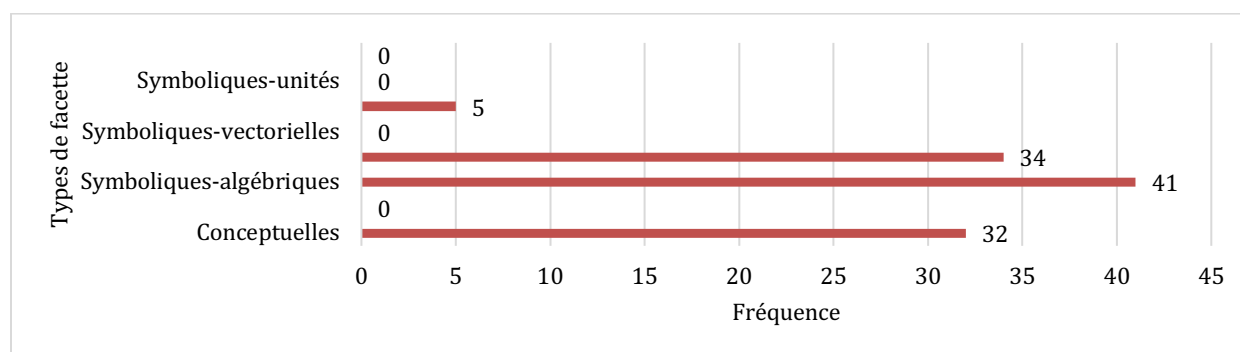


Figure 86- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon leurs types chez l'enseignante 1

Dans ce groupe de facettes, la prise en charge du savoir se fait autrement que dans les autres groupes de facettes. En effet, même si la prise en charge du savoir se fait beaucoup par

l'enseignante (48 facettes sur 112), une partie importante des facettes est prise en charge par les élèves seuls (35 facettes sur 112) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (25 facettes sur 112) (**figure 87**).

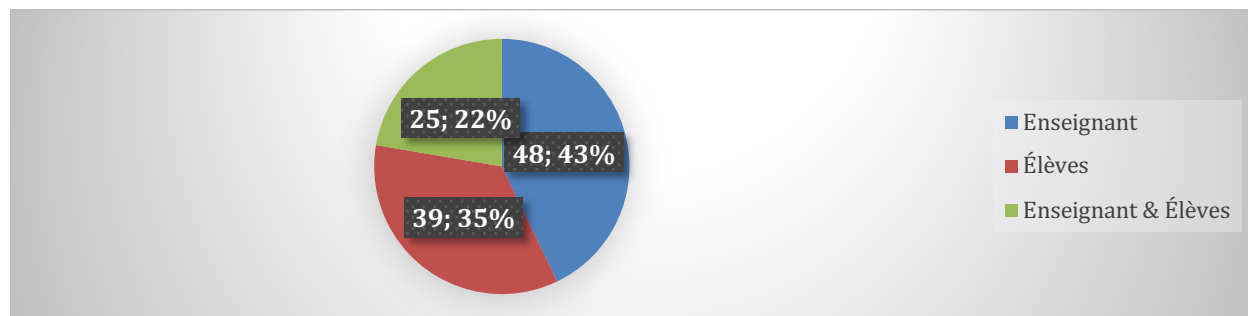


Figure 87- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignante 1

Comme c'est le cas des facettes MRU, la majorité des facettes MRUA ont une continuité très faible. Huit facettes se démarquent de celles-ci avec une continuité faible (**annexe 19, tableau 15**). Ces facettes sont des facettes conceptuelles et algébriques et portent sur la grandeur de la position et de la vitesse d'un mobile en MRUA, sur des relations mathématiques mettant en jeu la position, l'accélération et le temps, la position, la vitesse et le temps, la vitesse, l'accélération et la position, ainsi que la vitesse, l'accélération et le temps dans un MRUA.

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Sur un plan incliné, l'accélération varie selon l'angle d'inclinaison du plan » introduite 5 fois dans les séances 7, 11 et 13 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un MRUA, la position varie de plus en plus ou de moins en moins vite dans le temps » introduite 6 fois dans les séances 5, 7, 10 et 11 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un MRUA, la vitesse varie d'instant en instant, de façon régulière » introduite 7 fois dans les séances 5, 7, 8 et 11 ; et de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement en chute libre, la variation de la vitesse est régulière dans le temps » qui est introduite 5 fois dans les séances 10 et 11.

Pour les facettes algébriques, il s'agit de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la position, l'accélération et le temps (PAT) est :  $x_f = x_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$  ou une relation équivalente » introduite 5 fois dans les séances 10 et 11 ; de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la position, la vitesse et le

temps (PVT) est  $x_f = x_i + \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$  » introduite 5 fois dans les séances 10 et 11 ; de la facette MRUA-ALGÈBRE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et la position (VAP) est  $v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i) = v_i^2 + 2a(\Delta x)$  ou une relation équivalente » introduite 6 fois dans les séances 10 et 11, de la facette MRUA-ALGÈBRE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et le temps (VAT) est  $v_f = v_i - a\Delta t$  ou une relation équivalente » introduite 6 fois dans les séances 10 et 11 ; et de la facette MRUA-ALGÈBRE « Dans un mouvement en chute libre, la formule mettant en relation, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et le temps (VAT) est  $v_f = v_i - g\Delta t$  ou une relation équivalente » introduite 6 fois dans la séance 10.

Dans l'épisode 52 de la séance 7 consacré au MRUA, les élèves sont appelés à effectuer une lecture individuelle de la théorie sur le MRUA dans le cahier d'apprentissage. C'est donc ce cahier qui se substitue à l'enseignant relativement à la prise en charge des tâches épistémiques. L'introduction du MRUA dans le cahier d'apprentissage se fait par une exemplification multiple de ce mouvement.

Cahier d'apprentissage : Après s'être immobilisée à un feu rouge, une voiture accélère régulièrement jusqu'à ce qu'elle atteigne sa vitesse de croisière. Au cours des premières secondes de son ascension, une fusée connaît une phase d'accélération très rapide. Voilà deux exemples d'objets décrivant un mouvement rectiligne dont l'accélération peut être considérée comme constante. La figure 2.7 en montre un troisième (une pomme qui tombe d'un arbre décrit un mouvement rectiligne uniformément accéléré). On donne à ce mouvement le nom de « mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) (Enr séance 7, Ens 1)

Après cette exemplification, le cahier d'apprentissage définit un mouvement uniformément accéléré comme étant un mouvement dans lequel la grandeur et l'orientation de l'accélération sont constantes en tout temps. Dans l'épisode 63 de la séance 10, l'enseignante effectue, en grand groupe, la correction d'un problème d'application. Après avoir expliqué aux élèves la procédure pour calculer des vitesses instantanées à partir d'un tableau positions-temps, elle sollicite les élèves à décrire la variation de la vitesse de la balle pour 8 intervalles de temps dans son mouvement ascendant et descendant, depuis sa vitesse initiale jusqu'à sa vitesse finale. La description faite par plusieurs élèves (la vitesse de la balle diminue dans son mouvement ascendant alors qu'elle augmente dans son mouvement descendant) est évaluée positivement par l'enseignante. Dès lors,

elle représente le tracé du graphique vitesse-temps de cette balle lancée vers le haut à une vitesse de 39,2 m/s et interprète de manière plus approfondie la variation de la vitesse de la balle entre 0 et 8 s, en ajoutant la notion de régularité : dans son mouvement ascendant, la vitesse de la balle a diminué de façon régulière pour atteindre une vitesse nulle, puis dans son mouvement descendant, elle a augmenté de façon régulière. Cette interprétation fait suite à la sollicitation des élèves de la part de l'enseignante à déduire des informations du graphique vitesse-temps de la balle, lesquelles en déduisent que la variation de la vitesse de la balle est régulière en raison du tracé représenté par une droite (**figure 88**).

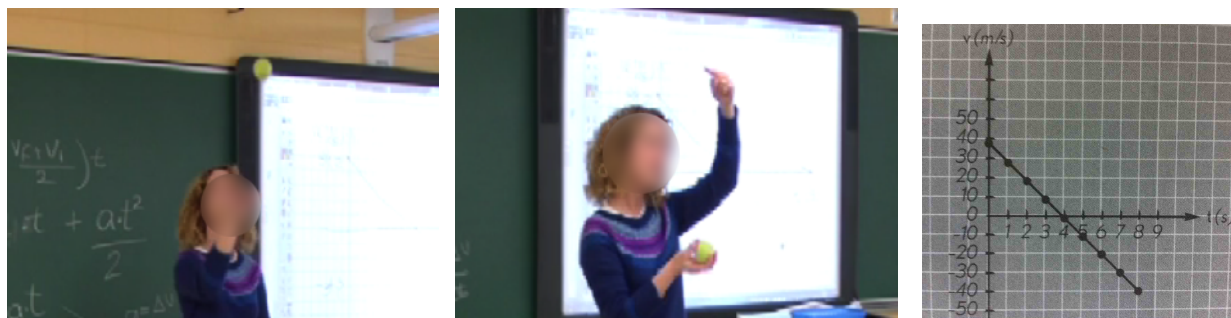


Figure 88- Interprétation de variation de la vitesse régulière d'une balle dans son mouvement ascendant et descendant (enseignante 1, séance 10)

Dans l'épisode 69 de la séance 11, l'enseignante aborde l'analyse du mouvement de mobiles en MRUA à l'aide de graphiques de manière analogue à l'analyse du mouvement de mobiles en MRU. Au point de départ, elle sollicite les élèves à définir ce qu'est un MRUA. L'enseignante et les élèves définissent à tour de rôle ce qu'est le MRUA en donnant deux caractéristiques de ce mouvement : « dans un MRUA, l'accélération du mobile est constante », « dans un MRUA, la vitesse du mobile est de plus en plus grande ».

Dans l'épisode 65 de la séance 10, une fois les analyses des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps des situations fictives de la voiture en MRU et en MRUA réalisées, un élève de la classe est appelé à faire la lecture intégrale de la page 67 du cahier d'apprentissage dédiée à la représentation mathématique du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Par le biais de cette lecture, l'élève définit quatre formules mathématiques d'un MRUA :

- La formule mathématique qui met en relation la position, la vitesse et le temps :  $x_f = x_i + \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$  ;
- La formule mathématique qui met en relation la position, l'accélération et le temps :  $x_f = x_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2$  ;
- La formule mathématique qui met en relation la vitesse, l'accélération et le temps :  $v_f = v_i + a\Delta t$  ;

- La formule mathématique qui met en relation la vitesse, l'accélération et la position :  $v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i) = v_i^2 + 2a(\Delta x)$ .

Après cette lecture, l'enseignante sélectionne le symbole  $S$  pour désigner la position qu'elle soit verticale ou horizontale et généralise l'application de ces quatre formules du MRUA aux événements se déroulant sur les référentiels vertical et horizontal. Puis, elle explique des adaptations mineures des trois premières formules, la quatrième formule l'utilisant intégralement (**figure 89**) : la première se réfère à l'adaptation de la formule  $x_f = x_i + \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$  pour obtenir la formule  $\Delta s = \frac{1}{2}(v_i + v_f)t$  ; la seconde se réfère à l'adaptation de la formule  $x_f = x_i + \frac{1}{2}a(v_i + v_f)\Delta t$  pour obtenir la formule  $\Delta s = v_i t + \frac{at^2}{2}$  ; la troisième se réfère à l'adaptation de la formule  $v_f = v_i - g\Delta t$  pour obtenir la formule  $\Delta v = at$  ou  $a = \Delta v/\Delta t$ .

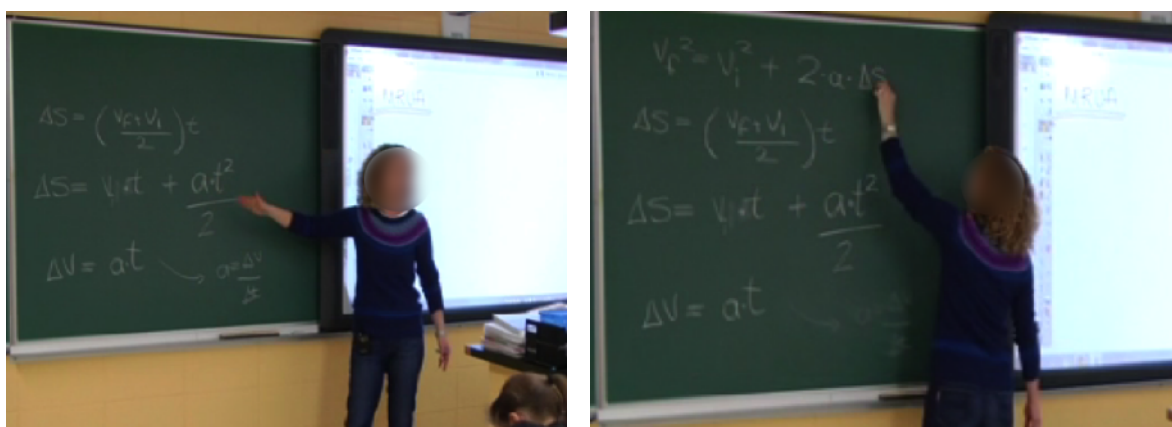


Figure 89- Explication d'adaptations mineures des formules générales du MRUA (enseignante 1, séance 10)

Par la suite, l'enseignante établit une relation entre les formules générales du MRUA et celles décrivant le mouvement d'un objet en chute libre. Pour ce faire, elle généralise les équations décrivant le mouvement d'un objet en chute libre présentées dans un encadré de la page 70 du cahier d'apprentissage (**figure 90**).

2.17 LES ÉQUATIONS DÉCRIVANT LE MOUVEMENT D'UN OBJET EN CHUTE LIBRE VERTICALE		
Équations du mouvement rectiligne uniformément accéléré	Équations du mouvement en chute libre verticale ( $x \rightarrow y, a \rightarrow -g$ )	Variables mises en relation
$x_f = x_i + \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$	$y_f = y_i + \frac{1}{2}(v_i + v_f)\Delta t$	La position, la vitesse et le temps écoulé
$x_f = x_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a(\Delta t)^2$	$y_f = y_i + v_i\Delta t - \frac{1}{2}g(\Delta t)^2$	La position, l'accélération et le temps écoulé
$v_f = v_i + a\Delta t$	$v_f = v_i - g\Delta t$	La vitesse, l'accélération et le temps écoulé
$v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i)$ $= v_i^2 + 2a\Delta x$	$v_f^2 = v_i^2 - 2g(y_f - y_i)$ $= v_i^2 - 2g\Delta y$	La vitesse, l'accélération et la position

Figure 90- Généralisation des équations du mouvement d'un objet en chute libre (enseignante 1, séance 10)

Cette généralisation permet de faire la transition entre les formules générales du MRUA et l'analyse du mouvement de mobiles à l'aide des représentations graphiques et des formules dans le cas particulier de la chute libre. Dans cette partie, c'est le cahier d'apprentissage qui prend en charge les tâches épistémiques visant l'appropriation des contenus théoriques (p. 70-73) se fait par une lecture individuelle en silence. Elle constitue pour l'enseignante un préalable à la réalisation d'exercices donnés à la fin de la séance et qui seront à terminer en devoir. Trois sections font l'objet d'une lecture : le mouvement en chute libre, la chute libre d'un objet préalablement au repos et la chute libre d'un objet préalablement en mouvement vertical. Ces sections présentent de manière spécifique les formules mathématiques de ces trois cas particuliers du MRUA.

### 3.2.4 Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1 sous l'angle des facettes de savoir

*Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, le savoir n'est pas uniquement introduit sous la forme de définitions formelles énoncées par l'enseignante, mais plutôt sous la forme de facettes de savoir (petits éléments de savoirs) formulées dans le langage des acteurs de la classe à travers diverses tâches épistémiques. Au total, 650 facettes de savoir sont introduites dans les 11 séances.*

*Dans cette séquence, la distribution des groupes de facettes associées aux concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire ne se fait pas de manière continue, ceux-ci se distribuant essentiellement sur les séances 1, 2, 5, 7, 9, 10 et 11.*

*La progression du savoir sur le plan thématique met en évidence une variabilité importante d'introduction des facettes selon les thèmes disciplinaires abordés. Alors que le thème 2-Vecteurs qui couvre plusieurs séances (3, 4, 6 et 8) n'est pas riche en termes d'introduction de facettes dans le domaine de la cinématique, d'autres groupes de facettes tels que la VITESSE, l'ACCÉLÉRATION, le MRU et le MRUA prédominent quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence, lesquelles comportent au moins le double du nombre de facettes par rapport aux autres groupes. Par ailleurs, nous relevons que les groupes de facettes se distribuent dans des proportions variables selon les thèmes disciplinaires retenus par l'enseignante et que certains thèmes mobilisent davantage des groupes de facettes particuliers : le thème 1-Variables du mouvement mobilise essentiellement les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, ACCÉLÉRATION ; le thème 3-MRU mobilise essentiellement les groupes de facettes VITESSE et MRU et le thème 4-MRUA mobilise essentiellement les groupes de facettes ACCÉLÉRATION et MRUA. Ceci indique une cohérence conceptuelle importante dans l'introduction des facettes de savoir en relation avec les thèmes disciplinaires retenus.*

*Il apparaît que la densité des groupes de facettes de cette séquence, c'est-à-dire le nombre de facettes introduites d'un même groupe par heure dans une séance (tous thèmes confondus) diffère*



*grandement selon les séances considérées : les deux premières séances sont très denses pour les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE et ACCÉLÉRATION ; la séance 7 est très dense pour le groupe de facettes MRU, et les séances 10 et 11 sont très denses pour le groupe de facettes MRUA.*

*Notre analyse de la densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires met en évidence une grande variabilité de la densité de ces groupes de facettes : les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE et ACCÉLÉRATION sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1-Variables du mouvement ; les groupes de facettes Vitesse et MRU sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3-MRU ; et les groupes de facettes ACCÉLÉRATION et MRUA sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 4-MRUA. Au niveau de cette séquence (tous thèmes disciplinaires confondus), quatre groupes de facettes se démarquent des autres quant à leur plus grande densité moyenne. Il s'agit des groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION, MRU et MRUA dont les densités moyennes sont nettement supérieures aux autres groupes. Nous postulons que l'importante irrégularité dans l'introduction des éléments de savoir pourrait entraver les apprentissages conceptuels chez les élèves.*

*Sur le plan du contexte de traitement des thèmes disciplinaires, les groupes de facettes sont essentiellement introduits dans des moments de théorisation (pour les groupes de facettes POSITION, DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, MRU et MRUA) ou dans des moments d'exercisation (pour les groupes de facettes DISTANCE PARCOURUE, ACCÉLÉRATION et MOUVEMENT). Ceci indique que l'enseignante 1 accorde une priorité à la théorie et aux exercices pour la construction des facettes de savoir en jeu dans la modélisation et la compréhension des phénomènes du monde matériel.*

*Sur le plan de la source d'émergence des facettes de savoir, nous observons une variabilité importante de cet indicateur selon les groupes de facettes. Dans cette séquence, les groupes de facettes POSITION, DISTANCE PARCOURUE, DÉPLACEMENT, VARIATION DE LA VITESSE sont ceux dont les facettes de savoir émergent le plus souvent à travers des situations fictives ; les groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION et MRU sont ceux dont les facettes de savoir émergent de manière décontextualisée ou à travers des situations fictives dans une proportion égale ; et les facettes de savoir du groupe de facettes MRUA émergent davantage des ressources didactiques. De manière générale, peu de facettes émergent de démonstrations expérimentales ou de situations expérimentales. Ainsi, la construction des faits scientifiques ne se fait pas en s'appuyant sur le recueil et l'analyse de données empiriques.*

*Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, les facettes des divers groupes de facettes sont en grande partie introduites en marge d'une démarche de modélisation. Seuls les groupes VITESSE, MOUVEMENT et MRUA comportent des facettes introduites dans les phases Problématiser, Investiguer et Conceptualiser et déployer d'une démarche de modélisation.*

*Quant aux types de facettes de savoir en jeu, nous relevons une prédominance des facettes de savoir conceptuelles dans la plupart des groupes de facettes. Deux autres types de facettes, les facettes SYMBOLIQUES-ALGÈBRIQUES et les facettes SYMBOLIQUES-GRAPHIQUES, présentent également une fréquence d'apparition très importante. Dans cette séquence, le savoir n'est donc*

*pas seulement d'ordre conceptuel, puisqu'il mobilise d'autres registres de représentation sémiotique, ce qui favoriserait les apprentissages, à condition que les registres soient mis en relation de manière adéquate.*

*Enfin, la prise en charge des facettes de savoir est largement du côté de l'enseignante pour tous les groupes de facettes, sauf pour le groupe de facettes MRUA où la configuration est différente de celle des autres groupes : la responsabilité est davantage du côté des élèves ou partagée entre l'enseignante et les élèves. Ceci indique que dans cette classe, les savoirs en jeu dans les processus de modélisation émergent davantage d'un dispositif d'enseignement-apprentissage s'inscrivant dans une logique transmissive.*

#### **4. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANTE 1**

Les principaux défis et difficultés associés à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation par les élèves qui ont été déclarés par l'enseignante dans les entrevues pré et postenregistrement se déclinent essentiellement en quatre catégories (**tableau 39**). Notre analyse de la pratique d'enseignement (observations du chercheur) montre cependant que les défis et difficultés associés aux modèles et à la modélisation observés se trouvent essentiellement du côté de la compréhension des savoirs conceptuels (concepts et modèles) de la physique (N=39) et de l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques (N=33), et que pour chacune des catégories décrites dans le tableau, les difficultés observées par le chercheur vont bien souvent au-delà de celles déclarées par l'enseignante, tant sur le plan qualitatif que quantitatif. En particulier, nous avons observé à plusieurs reprises une faible compréhension de la part de certains élèves de ce groupe en regard des concepts de vitesse et d'accélération. Sur le plan de l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques, l'interprétation et la prédiction du tracé d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps de mobiles en MRU ou en MRUA posent de sérieux défis aux élèves. Enfin, dans l'application d'opérations formelles, les élèves ont beaucoup de difficulté à calculer une vitesse ou une accélération (moyenne ou vitesse instantanée) à partir des données d'un graphique position-temps ou accélération-temps.

Tableau 39 : Défis et difficultés associées à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1

Du côté des élèves, les principaux défis et difficultés associés à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...	N* (déclaré)	N* (observé)
<b>1. la compréhension des savoirs conceptuels (concepts et modèles) de la physique</b>	<b>7</b>	<b>39</b>
Représentation d'un mobile dans un référentiel à une ou deux dimensions	x	
Déplacement et vecteur déplacement	x	S5(2)
Distance parcourue		S5
Vitesse scalaire (instantanée et moyenne), vitesse vectorielle, vitesse vectorielle (instantanée, moyenne, constante)		S1(6), S2, S7(3)
Signe de la vitesse (interprétation d'une vitesse négative)		S7
Vecteur vitesse		S5
Signe de la variation de vitesse (interprétation d'une variation de vitesse positive)		S1(2)
Accélération, accélération scalaire (instantanée et constante), accélération vectorielle, accélération vectorielle constante	x	S2(8)
Signe de l'accélération (interprétation d'une accélération nulle, positive et négative)		S2(3), S10
Unité de mesure associée à l'accélération		S3, S10
Mouvement uniforme, mouvement accéléré		S10(2)
Mouvement rectiligne uniforme (description partielle du MRU, variation de la position dans un MRU)		S7, S11
Mouvement rectiligne uniformément accéléré (variation de la position dans un MRUA, accélération sur un plan incliné descendant)		S7, S11
Sens d'un vecteur	x	
Vecteur résultant vs vecteur équilibrant		S6 et S9
<b>2. l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques</b>	<b>4</b>	<b>33</b>
Reconnaissance du type de graphique à partir de ses variables	x	S7
Description du tracé (allure de la courbe ou relation mathématique) d'un graphique position-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA		S9, S11(2)
Interprétation du tracé d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA	x	S9(3), S11(3)
Interprétation du taux de variation d'un graphique position-temps d'un mobile en MRUA	x	S10
Interprétation de l'aire sous la courbe d'un graphique vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA	x	S7(2), S9, S11
Exemplification du tracé d'un graphique vitesse-temps d'un mobile en MRUA		S9(3)
Prédiction du tracé d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA		S10(8), S11(6)
Représentation d'une courbe de régression associée à un graphique position-temps d'un mobile en MRUA (sur un plan incliné)		S11
Déduction de formules mathématiques d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA	x	
<b>3. la mise en application d'opérations formelles (algébriques et vectorielles)</b>	<b>6</b>	<b>13</b>
Procédure pour calculer une vitesse ou une accélération (moyenne ou vitesse instantanée) à partir des données d'un graphique position-temps ou accélération-temps	x	S2, S3, S9, S10, S11
Procédure pour convertir des unités de mesure de vitesse (km/h à m/s) ou opérer sur des unités de mesure		S2, S3, S7
Procédure pour mesurer la norme du vecteur		S3
Procédure pour composer un vecteur à partir de ses composantes		S3
Procédure pour représenter un vecteur dans le plan cartésien		S3
Procédure pour effectuer une addition vectorielle à l'aide de la méthode graphique		S5, S6
<b>4. La compréhension globale ou de certaines parties de la démarche de modélisation</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
Formuler d'une hypothèse dans le laboratoire <i>Descente sur un plan incliné</i> à partir du but et des enjeux du laboratoire		S11

\***Légende** : La valeur de N (déclaré) est déterminée à partir des pratiques déclarées dans les entretiens alors que la valeur de N (observé) est déterminée à partir des pratiques observées par le chercheur à partir des enregistrements vidéos.

Sur le plan des difficultés d'ordre conceptuel rapportées par l'enseignante (N=7), celle-ci pointe du doigt la faible compréhension des élèves quant au concept d'accélération, plus particulièrement les unités de mesure associées à l'accélération. Les autres difficultés soulevées concernent la représentation d'un mobile dans un référentiel à une dimension (sur la droite numérique) ou à deux dimensions (plan cartésien) en recourant aux signes du mouvement (positif et négatif) et aux représentations vectorielles. Le sens du concept de vecteur et son application dans la réalité pour l'étude de phénomènes physiques (force, déplacement, vitesse, accélération) sont également visés. Après la réalisation du *laboratoire La souque à corde scientifique*, l'enseignante constate que les élèves ont eu beaucoup de difficulté à se représenter ce qu'est un vecteur.

P : Ils n'ont pas de difficulté à comprendre le concept d'accélération, mais ils ont de la **difficulté à comprendre le concept des unités associées à l'accélération**. (Ent pré 1, ens 1)

P : Et il y en a d'autres pour qui, la **difficulté c'est de se représenter dans l'espace**. Puis, bien comme je le disais précédemment de **se représenter une valeur négative, que représente une valeur positive** parce que moi je viens de le rajouter là-dedans que valeur négative, valeur positive, ce n'est pas seulement sur une droite numérique, mais c'est aussi dans l'espace. (Ent pré 2, ens 1)

P : Les principales difficultés résidaient vraiment dans **la représentation de ce qu'est un vecteur**, alors ils ont beaucoup de difficultés à se le représenter, à comprendre ce que ça veut dire. Malgré les exemples que je donne, on dirait que ça n'a pas de sens pour eux. Alors quand vient le temps de les calculer, là ils ont beaucoup de difficultés. (Ent post 3, ens 1)

Notre analyse de la pratique d'enseignement montre une faible compréhension de la part des élèves sur le sens des concepts d'accélération, d'accélération scalaire (instantanée et constante), d'accélération vectorielle et d'accélération vectorielle constante (à 8 reprises dans la séance 2) et sur les unités de mesure associées à l'accélération (à 3 reprises dans les séances 2 et 10). Quant à la représentation d'un mobile dans un référentiel en recourant aux signes du mouvement et aux représentations vectorielles, nos observations font état de la difficulté des élèves à interpréter la vitesse négative d'un mobile (à 1 reprise dans la séance 7), la variation de la vitesse positive d'un mobile (à 2 reprises dans la séance 1), l'accélération positive, négative ou nulle d'un mobile (à 4 reprises dans les séances 2 et 10) et à distinguer entre un vecteur résultant et un vecteur équilibrant dans la modélisation expérimentale et théorique d'un système de forces (à 2 reprises dans les séances S6 et S9). Mais les difficultés conceptuelles que nous avons observées vont au-delà de celles déclarées par l'enseignante. En effet, nous avons constaté que les élèves ont également des difficultés de compréhension d'ordre conceptuel liées aux concepts de déplacement (à 2 reprises

dans la séance 5), de distance parcourue, de vitesse scalaire (instantanée et moyenne), de vitesse vectorielle (instantanée, moyenne, constante), de mouvement uniforme et de mouvement accéléré (à 2 reprises dans la séance 10), de mouvement rectiligne uniforme (à 2 reprises dans la séance 11) et de mouvement rectiligne uniformément accéléré (à 2 reprises dans la séance 11).

Sur le plan des difficultés liées à l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques rapportées par l'enseignante (N=7), celle-ci fait état de la difficulté des élèves à reconnaître le type de graphique en jeu à partir de ses variables, à interpréter les tracés des graphiques position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps en vue de décrire le mouvement de mobiles et à déduire des formules mathématiques de ces graphiques.

P : Ce qui fait qu'en termes de modèles c'est vrai que je vais utiliser la représentation graphique puis ça aussi c'est un **défi pour eux autres d'associer une représentation graphique dans le plan cartésien aux notions d'accélération et de vitesse**. (Ent pré 1, ens 1)

P : Puis ce que j'anticipe aussi, c'est **quand on visualise un graphique de ne pas voir la courbe dans un graphique**, de ne pas voir comme si c'était le trajet d'un mobile, mais bien les informations qui sont représentées à l'intérieur. (Ent pré 4, ens 1)

P : Bien comme je le disais tantôt, pour certains élèves qui ont encore la barrière des mathématiques pour qui c'est tout le temps difficile là, bien eux autres ils se butent à des difficultés de se dire bien oui, mais **ce sont des formules mathématiques**, puis je ne comprends pas comment on peut retrouver ça dans un graphique. Donc oui pour eux ça peut être une difficulté, mais en même temps moi je pense que de le montrer le lien entre la formule et le graphique, ça peut aussi faire débloquer pour certains élèves de dire ah mon dieu, mais c'est vrai là que je **peux retrouver la formule directement à l'aide d'un graphique**. (Ent pré 3, ens 1)

Notre analyse de la pratique d'enseignement du point de vue des défis et difficultés associés à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation chez les élèves montre en effet une faible compréhension de la part des élèves à reconnaître le type de graphique en jeu à partir de ses variables (à 1 reprise dans la séance 7), à interpréter le tracé d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA (à 6 reprises dans les séances 9 et 11), à interpréter le taux de variation d'un graphique position-temps d'un mobile en MRUA (à 1 reprise dans la séance 10) et à interpréter l'aire sous la courbe d'un graphique vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA (à 4 reprises dans les séances 7, 9 et 11). Comme c'est le cas des difficultés d'ordre conceptuel, les difficultés liées à l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques que nous avons observées dépassent

largement celles déclarées par l'enseignante, tant au niveau qualitatif que quantitatif. Dans cette catégorie, nous avons constaté une faible compréhension de la part des élèves à décrire le tracé (l'allure de la courbe ou la relation mathématique associée) d'un graphique position-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA (à 3 reprises dans les séances 9 et 11), à exemplifier le tracé d'un graphique vitesse-temps d'un mobile en MRUA (à 3 reprises dans la séance 9), à prédire les tracés d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps d'un mobile en MRU ou en MRUA (à 14 reprises dans les séances 10 et 11). Par ailleurs, nous avons constaté la difficulté des élèves à représenter les courbes de régression associées à un graphique position-temps d'un mobile en MRUA (sur un plan incliné) dans la séance 11.

Sur le plan des difficultés liées à la mise en application d'opérations formelles algébriques et vectorielles rapportées par l'enseignante (N=6), celle-ci fait état de la difficulté des élèves à manipuler des expressions algébriques (formules et équations mathématiques). Il s'agit plus précisément de la difficulté des élèves à sélectionner une formule ou une équation mathématique du mouvement appropriée à une situation et à appliquer cette formule en effectuant des opérations algébriques formelles. À ce sujet, elle rapporte la difficulté des élèves à calculer une accélération. Les manipulations vectorielles présenteraient également des difficultés.

P : Pour mes élèves évidemment c'est **l'application des formules de choisir la formule adéquate à la résolution de problème** qu'ils ont à faire ça, ça été un problème pour eux. (Ent post 4, ens 1)

P : Oui la **notion d'accélération est très complexe pour eux autres au niveau de la calculer** puis de comprendre les unités associées à l'accélération. (Ent pré 1, ens 1)

P : Les principales difficultés des élèves résidaient vraiment dans la **représentation de ce qu'est un vecteur**. Alors ils ont beaucoup de difficultés à se le représenter, à comprendre ce que ça veut dire. Malgré les exemples que je donne, on dirait que ça n'a pas de sens pour eux. Alors quand vient le temps de les calculer, là ils ont beaucoup de difficultés. (Ent post 3, ens 1)

Notre analyse de la pratique d'enseignement montre une faible compréhension de la part des élèves à effectuer des opérations algébriques pour le calcul de vitesses ou d'accélérations (moyenne ou instantanée) à partir des données d'un graphique position-temps ou accélération-temps (à 5 reprises dans les séances 2, 3, 9, 10 et 11), pour la conversion d'unités de mesure de la vitesse (passage du km/h au m/s) ou encore pour déterminer des unités de mesure (à 3 reprises dans les séances 2, 3 et 7). Il en est de même pour les manipulations vectorielles où nous avons constaté

que les élèves ont de la difficulté à mesurer la norme du vecteur, composer un vecteur à partir de ses composantes et à représenter un vecteur dans le plan cartésien (à 3 reprises dans la séance 3).

Enfin, la compréhension globale ou de certaines parties de la démarche de modélisation est rapportée par l'enseignante comme étant un autre défi ou difficulté des élèves. Il s'agit, d'une part, de la difficulté des élèves quant au niveau d'intégration de la démarche en référence à la mobilisation de l'ensemble des étapes de la démarche en vue de la résolution d'un problème. À ce sujet, elle pointe du doigt, plus particulièrement, la phase de décodage du problème dans laquelle les élèves doivent distinguer les données pertinentes des données non pertinentes dans l'énoncé d'un problème et la phase d'analyse et de discussion où il s'agit notamment de décrire et de discuter des résultats obtenus. Par ailleurs, elle affirme que le défi est d'autant plus grand pour les élèves qui ont bien intégré cette démarche en raison de leur faible motivation à élaborer l'ensemble des étapes. Enfin, le recours à deux méthodes complémentaires dont les procédures sont différentes, en l'occurrence les méthodes algébrique et graphique d'addition vectorielle, pour obtenir des résultats identiques ou similaires (les vecteurs équilibrants expérimental et théorique) constitue un défi particulier pour les élèves.

P : Bien oui parce que lorsqu'ils lisent l'énoncé d'un problème ils ont **beaucoup de difficulté à identifier les variables nommées dans le problème, d'en ressortir les données importantes. Parfois, ils ne vont pas discriminer les données importantes de celles qui ne sont pas importantes.** Dans leur tête à eux si une valeur est numérique, c'est automatique qu'elle soit importante alors que parfois elle ne l'est pas du tout. (Ent pré 4, ens 1)

P : Il y a d'autres élèves qui vont avoir beaucoup beaucoup **beaucoup de difficulté à verbaliser au niveau de l'analyse des résultats, puis de la discussion de verbaliser, décrire ce que représentent les résultats.** Donc, c'est ça que je vois comme difficulté. (Ent pré 2, ens 1)

P : La plupart du temps, il y a deux types de difficultés que je vais voir et souvent ce n'est pas le même type d'élève qui va avoir ces difficultés-là. Une des difficultés que je prévois, c'est de **bien comprendre que les mêmes valeurs, les mêmes chiffres, vont faire partie de deux calculs différents, avec deux méthodes différentes, mais que normalement on devrait arriver au même résultat.** Donc, je parle d'additionner des vecteurs avec la façon **graphique** donc on les dessine, on les mesure, bon et tout, puis avec la **méthode algébrique.** Donc, il y a des élèves pour lesquels c'est bien difficile de démêler qu'il y a vraiment deux façons de calculer, deux façons complètement différentes de faire des calculs, des additions de vecteurs, mais que normalement je suis censée d'arriver à la même réponse. (Ent pré 2, ens 1)

Dans notre analyse de la pratique d'enseignement, nous avons identifié à la séance 11 une faible compréhension de la part des élèves à formuler une hypothèse dans le laboratoire *Descente sur un plan incliné* à partir du but et des enjeux de ce laboratoire.

Du côté de l'enseignante, les principaux défis et difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation déclarés par l'enseignante dans les entrevues pré et postenregistrement se déclinent essentiellement en trois catégories : 1) le recours à des modalités d'enseignement qui favorisent la compréhension et les apprentissages de l'ensemble des élèves ; 2) les caractéristiques psychopédagogiques des élèves (niveau de compréhension, motivation, etc.) ; 3) les facteurs de nature logistique (temps, disponibilité des ressources matérielles, etc.) (**tableau 40**). Sur le plan des modalités d'enseignement qui favorisent la compréhension et les apprentissages des élèves (N=7), elle évoque le défi de recourir à des stratégies d'enseignement qui puissent amener l'ensemble des élèves à comprendre les savoirs disciplinaires à enseigner dans un contexte où il y a une grande disparité entre les élèves. À ce sujet, elle fait notamment référence à des stratégies visant à amener les élèves à construire des représentations graphiques claires ou à de stratégies pour représenter plus clairement ce qu'est un vecteur en physique, concept qui est très abstrait pour les élèves. Elle évoque également son défi à identifier la nature des blocages chez les élèves, s'ils sont de nature conceptuelle ou s'ils relèvent d'opérations mathématiques. Enfin, lors de la mise en oeuvre de la démarche de modélisation dans le contexte d'une résolution de problèmes, elle évoque son défi à appliquer intégralement l'ensemble de la démarche, même si le problème est facile, sans quoi elle peut « perdre » les élèves. Sur le plan des caractéristiques psychopédagogiques des élèves (N=2), c'est le niveau de compréhension des élèves en mathématiques qui est concerné. Ce défi est directement en lien avec le précédent, car les contenus mathématiques étant largement mobilisés dans l'enseignement de la physique, cela pose des défis particuliers pour l'avancement du cours. Enfin, en ce qui concerne les facteurs de nature logistique (N=10), deux types de facteurs sont fréquemment rapportés par l'enseignante. Il s'agit, d'une part, de la disponibilité de ressources matérielles qui puissent permettre aux élèves de se donner une compréhension plus approfondie du mouvement de mobiles par l'analyse de leurs variables respectives (position, vitesse et accélération). À ce sujet, elle cite le logiciel de simulation informatique *Labquest* qui permet de simuler de manière dynamique le mouvement d'un mobile tout en faisant la construction de ses graphiques. Il s'agit, d'autre part, de la contrainte temporelle



avec laquelle l'enseignante doit composer pour couvrir l'ensemble de son programme en considérant la nature des activités prévues (certaines sollicitent parfois un temps important pour les explications en plénière et un temps moindre pour le travail en équipe) et le niveau de compréhension des élèves (la nécessité d'adapter la planification des séances afin d'approfondir la compréhension des élèves).

Tableau 40 : Défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation (du côté de l'enseignant) selon l'enseignante 1

<b>Du côté de l'enseignante, les principaux défis et difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation sont...</b>
<b>1. le recours à des modalités d'enseignement qui favorisent la compréhension et les apprentissages de l'ensemble des élèves (N=7)</b>
P : Pour moi, la grande difficulté que j'ai vécue dans les trois périodes je pourrais dire, c'est vraiment la grande disparité chez mes élèves au niveau de la compréhension. Alors j'essaie <b>d'amener tout le monde au même niveau de compréhension</b> , mais ce n'était pas le cas. Puis ma difficulté c'était de rejoindre certains élèves à qui je voulais <b>expliquer les concepts</b> sans perdre d'autres qui avaient déjà tout compris. (Ent pré 2, ens 1)
<b>2. les caractéristiques psychopédagogiques des élèves (niveau de compréhension des élèves (N=2))</b>
P : Ah bien oui je pourrais dire qu'une difficulté pour moi c'est que les <b>élèves qui sont dans ma classe ne sont pas tous du même niveau en mathématiques donc quand je parle de certaines notions</b> où l'on utilise des outils mathématiques. Bien j'essaie de m'assurer que tout le monde a compris la même chose. (Ent pré 1, ens 1)
<b>3. les facteurs de nature logistique (disponibilité des ressources matérielles et temps) (N=10)</b>
P : Peut-être que si j'avais, je dirais un genre de <b>petit logiciel qui me permettrait de voir un mobile qui se déplace sous les yeux des élèves, puis qu'en même temps le graphique</b> se faisait à l'écran parce que je pense que ça existe ça, je pense que c'est le logiciel qui s'appelle <i>Labquest</i> ou quelque chose comme ça, peut-être que ça serait encore plus visuel pour les élèves, mais encore là ça ne ferait pas le lien avec la formule mathématique. (Ent pré 3, ens 1) P : Oui j'ai toujours une préoccupation par rapport au temps parce <b>qu'il faut que je gère le temps correctement afin que nous ayons le temps de tout faire cela puis ne pas brusquer les élèves qui sont plus lents</b> , mais les mettre en action. (Ent pré 2, ens 1)

Dans les entrevues postenregistrement, nous avons demandé à l'enseignante d'identifier des conditions ou des facteurs qui ont facilité et entravé l'enseignement et l'apprentissage des modèles et des démarches visant l'acquisition des modèles. Du point de vue des facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation (**tableau 41**), l'enseignante évoque la contextualisation des savoirs de la physique dans des situations réelles (N=1). Par exemple, lors de l'enseignement des concepts de vitesse et d'accélération, elle fait appel à l'expérience pratique des élèves lorsqu'ils font du vélo ou conduisent une automobile dans la séance 1. Si, pour elle, les représentations graphiques ou iconiques proposées par le manuel scolaire ou les simulations informatiques que nous pouvons trouver sur Internet sont nécessaires à la compréhension de ces mouvements, elles demeurent néanmoins insuffisantes comme nous l'avons

déjà souligné précédemment. Le recours à des dispositifs matériels concrets s'avère essentiel (N=1). De ce fait, dans les séances 1, 2, 7 et 10, l'enseignante utilise à plusieurs reprises le charriot de laboratoire pour modéliser le mouvement de mobiles dans différentes situations dans le cadre de démonstrations expérimentales. Il n'en demeure pas moins que les simulations informatiques proposées par la maison d'édition sont pour elle d'une grande utilité pour la compréhension du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré chez les élèves (N=2). Dans les séances 10 et 11, l'enseignante sollicite à plusieurs reprises les élèves à prédire les tracés d'un graphique position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps de mobiles en MRU et en MRUA. Elle pense également que l'utilisation du logiciel *Labquest* serait également bénéfique pour l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation. Que ce soit lors de l'étude du mouvement d'un mobile en MRU ou en MRUA, la comparaison en grand groupe des représentations graphiques de ces mouvements favorise grandement la compréhension des élèves des modèles du MRU et du MRUA (N=1). Dans la séance 11, l'enseignante sollicite les élèves à comparer les graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile poursuivant un même mouvement, soit en MRU ou en MRUA, d'une part, et à comparer les graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps entre un mobile en MRU et un autre mobile en MRUA, d'autre part. L'engagement des élèves dans des laboratoires est aussi un facteur facilitant la compréhension des modèles (N=1). À ce sujet, elle fait référence au laboratoire *Descente sur un plan incliné* qui a permis aux élèves de se donner une compréhension qualitative et quantitative du mouvement d'un mobile sur un plan incliné, et qui a eu comme conséquence de faciliter par la suite la construction de la formule mathématique de l'accélération scalaire ( $a = 9,8 \sin \theta$  où  $\theta$  est l'angle du plan incliné) en grand groupe lors de la séance 11. Quant au recours à l'interdisciplinarité dans l'enseignement de la physique (N=1), pour expliquer la vitesse instantanée, l'enseignante fait référence dans la séance 1 au cours de chimie dans lequel les élèves ont déjà calculé la vitesse d'une réaction chimique. Enfin, elle rapporte deux autres facteurs facilitant l'étude du mouvement de mobiles, soit l'introduction du calcul vectoriel au début de l'apprentissage de la mécanique (N=1), car la modélisation du mouvement de mobiles se déplaçant dans un référentiel à deux dimensions nécessite le recours à des systèmes de vecteurs, et la taille réduite du groupe d'élèves de manière à pouvoir mieux répondre aux questions des élèves (N=1).

Tableau 41 : Facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1

<b>Pour moi, les principaux facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...</b>
<b>1. la contextualisation des savoirs de la physique dans des situations réelles (N=1)</b>
P : Ce qui a pu faciliter aussi les choses pour la <b>conscience du mouvement de ce que représente un mouvement, un freinage, une diminution de vitesse, ce sont ceux qui font des cours de conduite présentement</b> , puis ce sont ceux qui ont déjà un permis de conduire. Donc, de faire référence à cela, ça aide énormément pour qu'eux se représentent facilement les mouvements. (Ent post 1, ens 1)
<b>2. l'utilisation de dispositifs matériels concrets (N=1)</b>
P : Bon [...] je ne pourrai pas me baser uniquement sur le matériel que j'ai, le manuel. Ça ne serait pas suffisant. <b>J'ai besoin de démontrer avec du matériel très très simple, mais du matériel physique</b> , des repères dans la classe, <b>un petit modèle comme là j'avais un petit charriot en métal</b> , mais il faut rajouter ça au matériel au manuel que j'ai parce que dans le manuel ce sont des dessins donc il n'y a pas de mouvement impliqué. J'aurais pu aller chercher tout plein tout plein d'animations sur Internet parce qu'il en existe tout plein, mais je pense que rien n'équivaut en fait de prendre une petite voiture puis la faire déplacer concrètement devant les élèves pour ce type de démonstration là. (Ent post 1, ens 1)
<b>3. l'utilisation de simulations informatiques (N=2)</b>
P : Ce qui va être le plus utile, c'est <b>une des animations qui est dans le manuel et où on a sur un même graphique un mobile qui se déplace donc on peut le faire partir, soit le faire accélérer, soit décélérer, soit aller à vitesse constante et on voit à l'écran le graphique que ça va donner</b> , le tracé du graphique selon qu'on fait un graphique de position, de vitesse ou de temps. Donc c'est très visuel, c'est très interactif. Présentement les élèves ne sont pas prêts à le voir, mais dans une ou deux périodes-là, on va regarder ça ensemble, puis ça va être très parlant pour eux. (Ent pré 4, ens 1)
<b>4. La comparaison de représentations graphiques (N=1)</b>
P : la troisième chose que je crois qui était facilitant pour eux c'était que <b>j'ai vraiment pris le temps de comparer avec eux au tableau étape par étape les différents types de représentations graphiques</b> qu'on va obtenir d'un mobile en accélération ou d'un mobile en vitesse constante. (Ent pré 4, ens 1)
<b>5. l'engagement des élèves dans des laboratoires (N=1)</b>
P : Si je pense au <b>mouvement d'un objet en chute libre puis un mouvement d'un mobile sur un plan incliné ce qui est un petit peu facilitant c'était la période de laboratoire qu'il avait fait déjà précédemment</b> . Ils avaient déjà vu leur mobile descendre un plan incliné donc ils avaient déjà des petites notions à ce niveau-là. Donc quand je suis arrivée avec des <b>équations mathématiques ça avait un sens pour eux autres</b> . Ils avaient déjà une représentation dans leur tête puis j'étais capable de comparer une chute libre un objet qui tombe sans contrainte à un objet qui descend une pente puis de leur faire <b>comprendre vraiment vraiment facilement que l'angle avait un impact sur l'accélération du mobile</b> ce qui fait que ça je pense que ça été facilitant pour eux. (Ent post 4, ens 1)
<b>6. le recours à l'interdisciplinarité dans l'enseignement de la physique (N=1)</b>
P : Pour la plupart des élèves ce qui a facilité les choses, je pense à la vitesse, à la vitesse instantanée, <b>ce sont les liens que j'ai faits avec la chimie</b> parce que ceux qui font le cours de chimie en même temps que le cours de physique sont en train d'apprendre justement des calculs de vitesse. (Ent post 1, ens 1)
<b>7. l'introduction du calcul vectoriel au début de l'apprentissage de la mécanique (N=1)</b>
P : Ce qui a été facilitant pour eux aussi c'est le choix que <b>j'avais fait de voir les calculs vectoriels au début début de la mécanique</b> , mais ça nous amenait d'avoir déjà une notion d'angle au niveau des mouvements donc ça, c'était facilitant (Ent post 4, ens 1)
<b>8. l'enseignement dans un groupe réduit d'élèves (N=1)</b>
P : Bien je dirais que lorsque je suis capable de l'expliquer étape par étape <b>avec un petit groupe d'élèves ça finit par trouver son sens</b> , mais quand vient le temps de l'expliquer à plusieurs en même temps, on dirait que s'ils ne sont pas capables de suivre toutes les étapes au même rythme que moi, bien on dirait que je les perds dans l'explication puis là ça ne vaut plus la peine. Ce qui fait que je dirais que <b>ce qui facilitait, c'était vraiment les petits groupes</b> (Ent post 4, ens 1).

Du point de vue des facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la modélisation (**tableau 42**), l'enseignante évoque la faible compréhension des savoirs disciplinaires chez les élèves (N=1). Il s'agit notamment de difficultés sur le plan mathématique quant à l'utilisation des référentiels pour décrire le mouvement de mobiles au moyen des signes du déplacement, de la vitesse et de l'accélération. Enfin, pour les facteurs entravant, elle réitère les facteurs de nature logistique (N=2) quant à la non-disponibilité de certaines ressources matérielles et au temps dont elle dispose pour son enseignement.

Tableau 42 : Facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignante 1

Pour moi, les principaux facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...
<b>1. la faible compréhension des savoirs disciplinaires chez les élèves (N=1)</b>
P : Bien il y en a toujours ce sont les <b>élèves qui ont des mini-blocages, mais au niveau mathématique</b> , ceux qui ont vraiment encore de la difficulté à se représenter que veut dire une valeur négative par rapport à une valeur positive. Il y en a que c'est encore vraiment difficile pour eux autres. On dirait que ce n'est pas encore acquis. Et ceux qui ont encore, c'est relié à ça, ceux qui ont de la <b>difficulté avec les références</b> dire quel est mon point de référence. (Ent post 1, ens 1)
<b>2. les facteurs de nature logistique (disponibilité des ressources matérielles et temps) (N=2)</b>
P : Peut-être que si j'avais, je dirais un genre de <b>petit logiciel qui me permettrait de voir un mobile qui se déplace sous les yeux des élèves, puis qu'en même temps le graphique</b> se faisait à l'écran parce que je pense que ça existe ça, je pense que c'est le logiciel qui s'appelle Labquest ou quelque chose comme ça, peut-être que ça serait encore plus visuel pour les élèves, mais encore là ça ne ferait pas le lien avec la formule mathématique. (Ent pré 3, ens 1)
P : Bien je dirais une <b>contrainte de temps parce que moi j'ai un programme à faire</b> , donc un moment donné quand je dis que l'examen c'est telle date, j'ai la contrainte de temps. (Ent pré 2, ens 1)

## 5. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2

### 5.1 Conception d'un modèle chez l'enseignant 2

L'enseignant 2 conçoit la notion de modèle en sciences selon les trois attributs caractéristiques présentés dans le **tableau 43**. Dans sa description du modèle en tant que représentation simplifiée de la réalité (N=3), l'enseignant 2 qualifie le modèle comme étant une image que le modélisateur se donne, une représentation d'un concept, à partir de la cumulation de résultats d'expériences, lesquelles sont ensuite mises en œuvre de manière à valider le modèle.

Dans cette description, il insiste sur l'idée que le modèle en physique est représenté par un modèle mathématique construit sur la base de données expérimentales, et que par conséquent, les représentations mathématiques pouvant lui être associées ne sont pas des courbes parfaites comme c'est souvent le cas en mathématiques. Comme c'est le cas de l'enseignante 1, l'enseignant 2 évoque, à plusieurs reprises, l'idée que le modèle peut être représenté par des registres de représentation sémiotique divers ( $N=31$ ). Si les registres de représentation algébriques et graphiques sont de loin ceux les plus fréquemment rapportés dans le discours de cet enseignant, l'idée de complémentarité entre ces divers registres est toutefois soulevée. Dans la « phase de modélisation extrêmement mathématique », cet enseignant insiste à l'effet que les données expérimentales distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps doivent être traduites en des représentations tabulaires ( $N=1$ ), algébriques ( $N=12$ ) et graphiques ( $N=13$ ) pour la totalité des laboratoires. Cette phase de modélisation mathématique permet de caractériser le comportement des phénomènes étudiés et de mettre plus particulièrement en évidence la variation des facteurs retenus. Les extraits suivants montrent la nécessité de recourir à ces trois registres. Dans certains laboratoires, plus particulièrement ceux impliquant l'étude du mouvement d'objets matériels sur les plans inclinés (ex. : mouvement ascendant sur un plan incliné avec propulsion initiale, mouvement descendant sur un plan incliné sans propulsion initiale avec ou sans comparaison de milieux), les élèves doivent recourir à des représentations vectorielles ( $N=3$ ) en plus des représentations tabulaires, algébriques et graphiques. Ces représentations vectorielles sont nécessaires pour décrire les systèmes de forces qui agissent sur des objets matériels en mouvement sur ces plans inclinés. Le recours à ces représentations ajoute toutefois une certaine forme de complexité à la modélisation mathématique des phénomènes en jeu du fait qu'il implique la mobilisation de savoirs dans un autre domaine que celui de la physique cinématique, soit la physique dynamique. Enfin, les élèves peuvent également recourir à des dispositifs matériels concrets dans la modélisation des phénomènes ( $N=2$ ). À ce sujet, il cite l'exemple du recours possible à un pendule en bois pour modéliser le mouvement d'un pendule en référence avec l'expérience de Foucault. Selon l'enseignant 2, cette forme de modélisation concrète favorise la visualisation et l'assimilation des concepts. Contrairement à l'enseignante 1, l'enseignant 2 définit le modèle comme un objet mettant en relation le champ empirique avec le champ théorique ( $N=10$ ). Une fois le recueil des données réalisé par les élèves dans chacun des 8 laboratoires, ceux-ci sont appelés à mettre en relation les données qui relèvent de la physique, soit les données expérimentales

recueillies par les élèves eux-mêmes sur leur phénomène, et les données qui relèvent des mathématiques, soit les données théoriques qui consistent essentiellement en des modèles mathématiques théoriques existants. Deux phases sont retenues par cet enseignant pour qualifier cette mise en relation entre ces deux champs. La première phase qu'il qualifie de « phase extrêmement mathématique » consiste à construire les équations mathématiques (distance-temps, vitesse-temps, accélération-temps, etc.) de mouvement associé au phénomène à l'étude. Il s'agit d'une phase inductive (allant du champ empirique vers le champ théorique) dans laquelle les élèves mobilisent les outils mathématiques nécessaires en vue de la modélisation de leur phénomène (construction de représentations algébriques, graphiques, etc.). Dans la deuxième phase qu'il qualifie de « phase analytique » et que nous pourrions qualifier de phase déductive (allant du champ théorique vers le champ empirique), les élèves sont appelés à comparer les résultats obtenus, soit les modèles construits sur la base des données expérimentales, avec les résultats attendus, soit les modèles existants et formalisés sur ces mêmes phénomènes. Dans ce mouvement, les écarts entre les résultats obtenus et les résultats attendus entraînent plus particulièrement une réflexion sur les conditions d'expérimentation des laboratoires. Pour l'enseignant 2, c'est grâce à la fusion entre la partie théorique et la partie expérimentale que peut se produire véritablement la construction des concepts théoriques et la compréhension des phénomènes physiques par les élèves.

Tableau 43 : Conception d'un modèle chez l'enseignant 2

Un modèle...
<b>1. est une représentation simplifiée de la réalité (N=3)</b>
<p>P : Bien un modèle, c'est toujours d'essayer de se donner... <b>c'est une représentation en fait on essaye de s'imaginer quelque chose</b> qu'on ne... Bon quand on parle du modèle atomique et qu'on ne voit pas nécessairement donc <b>on se donne une image en fonction des résultats qu'on a cumulés</b> pendant de nombreuses années sur un concept quelconque. Bon est-ce que notre modèle répond à toutes ces expériences-là qu'on a faites bon alors <b>c'est vraiment une représentation, c'est une image je pense que oui je vais prendre le mot image.</b> C'est une <b>image qu'on se donne de quelque chose</b> [...] c'est vraiment une <b>représentation d'un concept</b> qu'on se fait et à partir de là bien on bâtit quelque chose pour essayer de la démontrer pour peut-être pour se rendre compte que le modèle est plus ou moins adapté. (Ent pré 1, ens 2)</p> <p>P : L'autre difficulté qu'ils ont c'est qu'<b>en mathématiques ça marche toujours super bien.</b> Ils font une fonction parabolique hey regarde ils font ça sur la petite calculatrice wow ce n'est pas ma réalité. <b>Le modèle est parfait. En sciences, ce n'est pas ça.</b> Là, les jeunes regardaient leurs graphiques, bien non ce n'est pas une parabole ça là. Puis là encore en secondaire 5 ils vont me tracer ça au point à point ce qui fait que là ils regardent ça puis... Bien ils n'ont jamais fait. Dans les livres de math, c'est toujours beau. <b>Ils ne connaissent pas ça un modèle issu de données expérimentales et ça devrait être la base parce que c'est ça la réalité.</b> Moi je me tue à leur dire qu'<b>une fonction qui arrive parfaitement ça n'existe pas.</b> Il y a toujours un paramètre qui va venir influencer quelque part. Bien en math on ne travaille que des contextes parfaits et ça, je trouve ça plate (...) (Ent post 6, ens 2)</p>

## 2. est représenté par des registres de représentation sémiotique divers comme... (N=31)

### a) des représentations algébriques (formules ou équations mathématiques) (N=12)

P : Lorsqu'ils font les liens entre le théorique et l'expérimental ils trouvent des choses, ils ont trouvé des résultats en lab, ils se rendent compte que ça marche plus ou moins alors là **ils essaient de trouver le modèle mathématique théorique** qui va permettre d'expliquer leurs résultats **donc là ils commencent à trouver les formules de vitesse, ils commencent à trouver les formules de distance, ils commencent à trouver les grosses équations vf au carré égale vi au carré plus 2 a delta s, ils commencent à trouver les grosses équations majeures au niveau des outils mathématiques** ce qui va leur permettre peut-être d'aller vérifier ou valider des résultats. (Ent pré 5, ens 2)

### b) des représentations graphiques (N=13)

P : Il y a **une phase graphique au niveau mathématique, toute la modélisation graphique qui est extrêmement importante**. Pour plusieurs labs, tous les paramètres de distance temps, vitesse vont être calculés déjà alors normalement après trois cours les vitesses commencent à se calculer ce qui veut dire que le cours 4 normalement je devrais commencer à voir des accélérations apparaître là donc les paramètres d'accélération devraient commencer à apparaître. Je les veux en table de valeurs, je les veux en calculs, **je les veux en graphiques OK** et là **ils vont me construire des graphiques et pour ceux qui ont des facteurs qui vont varier** bien je veux vraiment voir sur le graphique s'ils font un graphique de vitesse en fonction du temps, **je veux voir toutes les variations des essais qu'ils ont faits** alors si une équipe décide de faire une variation de plan incliné par exemple au niveau de l'angle bien je veux voir apparaître sur le graphique de vitesse-temps je veux voir tous les angles qu'ils ont utilisés avec les mêmes systèmes d'axes. **Je veux voir d'un coup d'œil rapide quel est l'effet de ton facteur sur tes différents phénomènes donc ça au niveau graphique, là ils sont vraiment dans la phase extrêmement mathématique.** (Ent pré 3, ens 2)

### c) des représentations vectorielles (N=3)

P : Là **on rentre dans la phase mathématique donc plusieurs si je travaille au niveau de mes plans inclinés, ils vont commencer déjà à rentrer dans les systèmes de forces donc tous les modèles vectoriels vont être impliqués là-dedans**. Ils vont être capables de rentrer ceux qui travaillent avec l'ascension du plan, il y a le **vecteur propulsion** avec lequel ils vont être bons pour rentrer aussi contrairement à l'autre qui ne l'a pas lorsque le plan descend (Ent pré 3, ens 2)

### d) des dispositifs matériels concrets (N=2)

P : Il y en a qui ont travaillé les petites choses, il y a une équipe je ne me souviens plus si c'est dans ce groupe-là, mais ils ont travaillé carrément le **pendule de Foucault. Ils se sont fait un petit modèle puis bon voici le pendule**. On va le faire osciller puis là je change l'axe de rotation de la Terre. Le pendule est toujours dans le même sens, peu importe comment la Terre, ce qui fait qu'il y en a un qui l'a fait en bois. Il l'a monté en bois puis il l'a bâti puis tout ça, **bon quelque chose pour développer puis assimiler un petit peu, visualiser ses concepts**. Alors ça fait partie des choses qu'ils ont travaillées. (Ent post 6, ens 2)

## 3. met en relation avec le champ empirique avec le champ théorique (N=10)

P : Les cours 4 même à la fin du 3 donc le 3, le 4, le 5 **on est dans une phase extrêmement mathématique** donc ils vont aller développer et ils vont commencer aussi à trouver ces fameux liens. Je voyais tantôt mon équipe en chute libre, mon équipe en balistique, ils ont déjà trouvé beaucoup d'équations. L'équation sur la portée dans le cas de ma balistique. En chute libre, ils ont trouvé les différents systèmes d'équations avec les vitesses, les temps, les distances (...) Donc là **ils vont commencer à rentrer dans le modèle mathématique au niveau algèbre et ils devraient commencer à faire le lien entre résultats théoriques** et versus hey c'est quoi que nous avons ? **Au niveau expérimental on est rendu à faire mon lien entre les math et la physique** tranquillement pas vite. (Ent pré 3, ens 2)

P : La prise de données ça fait partie des premiers objectifs qu'ils vont aller chercher. Il y a une **modélisation théorique qu'il faut qu'il se fasse** (...) Ça leur prend **leur base de comparaison** à savoir si ça marche ou pas. Ensuite (...) une fois qu'ils vont avoir leur volet mathématique ils vont rentrer dans la **phase analytique comparaison entre résultats obtenus et résultats attendus** ce qui va amener le monde à ce moment-là à peut-être retourner en lab suite aux erreurs de protocole. Peut-être qu'ils vont se dire, peu importe le protocole que je vais soumettre, je vais toujours avoir la même problématique donc ce n'est pas un problème au niveau de mon protocole, **c'est un problème de conditions d'expérimentation** dans laquelle je suis soumis alors à ce moment-

là c'est une **analyse qui va commencer à rentrer entre ces fameux éléments théoriques et la version expérimentale qu'ils ont**. (Ent pré 3, ens 2)

P : Alors c'est là que les premiers éléments théoriques vont commencer à sortir et c'est là qu'on va s'assurer de la validation, l'exactitude de ces résultats qu'ils ont trouvés au niveau théorique. Alors **je veux qu'ils voient c'est quoi ma théorie derrière mon mouvement** et ensuite je veux qu'ils comparent les deux : voici mon expérimental, voici mon théorique. Est-ce que ça marche ? Est-ce que ça ne marche pas ? Pourquoi ? Quelles sont vos meilleures hypothèses d'explication ? Et j'y vais vraiment avec le mot hypothèse. Sortez-moi le maximum d'hypothèses d'explication qui expliquent le lien entre votre expérimental et votre théorique. Si vous aviez à refaire ce lab, comment le referiez-vous ? Quelles seraient pour vous les conditions optimales pour que votre résultat appuie le plus possible celui qui est donné par la théorie si c'est possible ? C'est ça que je travaille avec eux autres. Alors il y a une **partie théorique, il y a une partie expérimentale, fusion des deux et en fait j'utilise le lab pour qu'ils m'amènent mes concepts théoriques**. (Ent pré 5, ens 2)

## 5.2 Conception de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2

À partir des entrevues préenregistrement menées auprès de l'enseignant 2, plus particulièrement des données issues des questions relatives aux principales phases (ou moments forts) de la démarche de modélisation et de notre cadrage conceptuel en lien avec la démarche de modélisation constructiviste, nous avons procédé à une reconstruction des phases de la démarche de modélisation mise en œuvre par l'enseignant 2. Contrairement à l'enseignante 1, c'est sur l'ensemble des 14 séances que se déploie la démarche de modélisation dans la séquence de l'enseignant 2. À l'[annexe 24](#), nous présentons la démarche de modélisation déployée par l'enseignant 2 structurée autour des quatre phases retenues dans notre cadre conceptuel, avec pour chacune d'elles les principales tâches réalisées par les élèves au sein de cette démarche. Par ailleurs, nous exposons des extraits significatifs en lien avec chacune des quatre phases de la démarche de modélisation telles qu'elle est conçue par cet enseignant.

Dans la phase *Problématiser*, les élèves sont appelés à s'approprier une situation empirique en lien avec un phénomène de la physique ainsi que le matériel de laboratoire en faisant diverses manipulations exploratoires. Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, cette phase de problématisation est amorcée à la séance 1 par des explications générales de la part de l'enseignant sur le projet global proposé aux élèves (épisodes 1-2, 11 à 13) dans laquelle 8 laboratoires leur sont attribués au hasard. Elle consiste par ailleurs en des explications spécifiques de la part de l'enseignant sur ces 8 laboratoires (épisodes 3 à 10) dont le mouvement des objets matériels peut être modélisé par l'un ou l'autre des 4 modèles suivants : 1) le modèle du



mouvement rectiligne uniforme (MRU) pour le laboratoire C (Mouvement sur table à coussin d'air) ; 2) le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) pour les laboratoires A (Mouvement en chute libre), B (Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale), D (Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale), E (Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale) et F (Mouvement sur plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu) ; 3) le modèle du mouvement balistique (composition du MRU et MRUA) pour le laboratoire G (Mouvement balistique) ; 4) le modèle du mouvement pendulaire pour le laboratoire H (Mouvement pendulaire). Ce projet qui implique non seulement des contenus disciplinaires de la cinématique, mais aussi de la dynamique, vise l'exploration par les élèves d'une diversité de phénomènes et la découverte des modèles du mouvement qui leur sont associés. Comme le souligne l'enseignant, lors de la présentation de ces laboratoires, aucun contenu disciplinaire n'est donné aux élèves, et encore moins des indications particulières quant aux modèles mathématiques en jeu. Comme tous les laboratoires nécessitent un recueil de données au moyen de sondes informatiques, l'un des enjeux importants dans cette phase de problématisation est la prise en charge graduelle par les élèves du matériel informatique à leur disposition (fonctionnalité de l'interface du logiciel et des sondes photoélectriques *Pasco*).

Dans la phase *Planifier*, les élèves sont appelés à concevoir un protocole de laboratoire qui comporte une liste de matériel, des buts à atteindre, des facteurs expérimentaux à explorer et des hypothèses explicatives relatives au phénomène à l'étude. Cette phase de planification qui est amorcée à la fin de la séance 1 (épisodes 14 à 21) et qui se poursuit tout au cours de la séance 2, (épisodes 22 à 50) engage les élèves dans la conception d'un protocole en lien avec le laboratoire qui leur a été attribué. Le degré d'ouverture des protocoles varie d'un laboratoire à l'autre en ce sens qu'ils comportent tous des buts obligatoires et des buts optionnels à atteindre, de même que des facteurs expérimentaux obligatoires et des facteurs expérimentaux optionnels à explorer. Quant à la modélisation des phénomènes, tous les élèves sont appelés à construire les relations mathématiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps dans les registres algébriques et graphiques, et à calculer les vitesses moyennes et accélérations moyennes de leurs objets, et ce, de manière à mettre en évidence la structure et le comportement de leur phénomène. Enfin, la phase de planification débouche sur la formulation d'hypothèses explicatives sur le comportement de leur phénomène en s'appuyant sur des savoirs de la physique et dans certains cas d'autres disciplines

comme la biologie et la chimie. Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, la phase de planification se réalise essentiellement dans la réalisation du laboratoire par les élèves.

La phase *Planifier* est suivie de la phase *Investiguer* qui occupe une proportion importante de la démarche de modélisation en regard du temps puisqu'elle se déploie de la séance 3 à la séance 7 (épisodes 51 à 183). Dans la phase d'investigation, les élèves sont appelés à : recueillir des données à l'aide des outils (ex. : ordinateurs, tablettes, etc.) et instruments de mesure (ex. : sondes Pasco) à leur disposition ; calculer des grandeurs physiques (notamment des positions, distances, vitesses instantanées, vitesses moyennes, accélérations instantanées, accélérations moyennes) ; modéliser mathématiquement leur phénomène à l'aide de représentations diverses (tabulaires, algébriques, graphiques et vectorielles) ; identifier des facteurs expérimentaux qui ont un effet ou non sur le phénomène à l'étude. Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, la phase d'investigation se réalise en alternant des explications générales de la part de l'enseignant avec des moments de réalisation des laboratoires par les élèves.

Enfin, la démarche de modélisation se clôture par la phase *Conceptualiser et déployer* dans laquelle les élèves sont appelés à présenter les objectifs et conditions de réalisation de leur laboratoire (buts, facteurs expérimentés, hypothèses explicatives initiales, etc.), à présenter les principaux résultats obtenus en expliquant le comportement de leur phénomène (facteurs qui l'influencent ou non) à l'aide d'un modèle, à évaluer les résultats obtenus en comparant le modèle expérimental (résultats obtenus expérimentalement) avec le modèle théorique (résultats attendus) et expliquer les écarts, à proposer des pistes d'amélioration du protocole en vue de rapprocher les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques et à appliquer les modèles construits dans de nouveaux contextes. La phase de *conceptualisation et de déploiement du modèle* s'étend de la séance 8 à la séance 14, de l'épisode 184 à l'épisode 227, et se réalise dans des contextes traitement des thèmes disciplinaires qui donnent à voir une grande alternance des explications générales et des moments de théorisation pris en charge l'enseignant avec des présentations de laboratoire et des moments d'exercisation pris en charge par les élèves.

## 6. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2

Sur le plan des finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique chez l'enseignant 2, notre analyse des réponses issues des questions « Pourquoi est-il utile pour les élèves d'apprendre les modèles que tu viens de m'énumérer ? » et « Pourquoi est-il utile pour les élèves d'apprendre une démarche de modélisation ? » permet de dégager six finalités décrites dans le [tableau 44](#).

La première finalité éducative associée à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique la plus fréquemment évoquée par l'enseignant 2 est la compréhension et la conceptualisation des phénomènes de la physique (N=25). C'est notamment la compréhension des 8 mouvements différents qui est recherchée et la désignation des facteurs expérimentaux obligatoires et optionnels qui influencent ou non ces mouvements. L'enseignant souhaite que les élèves deviennent des « spécialistes de leur domaine ». Pour cela, ils doivent maîtriser les bases théoriques sous-jacentes au mouvement à l'étude de manière à construire les concepts et les modèles mathématiques en lien avec leur mouvement. À ce sujet, il rappelle que c'est par la mise en relation entre le volet expérimental et le volet théorique que les élèves peuvent accéder à une véritable compréhension de leur phénomène.

La seconde finalité éducative est la mobilisation ou la construction de savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, etc.) (N=23). Avant d'engager les élèves dans les 8 laboratoires, l'enseignant spécifie que les élèves ont déjà des préalables quant aux concepts de force et de vecteur. Ils ont étudié les forces résistantes, les forces équilibrantes et la loi de Hooke dans des situations impliquant le mouvement d'objets matériels sur des systèmes compressés et ils ont construit des représentations vectorielles de ces systèmes dans des situations d'équilibre. Il spécifie également que le projet est placé à un moment de l'année académique où la majorité des modèles mathématiques ont été préalablement travaillés avec les élèves dans des cours antérieurs de physique (en mécanique et en optique) ou dans d'autres cours de mathématique ou de chimie. Ces modèles préalablement vus dans leurs registres algébriques ou graphiques doivent donc être mobilisés par les élèves dans de nouveaux contextes de la cinématique, en étudiant le mouvement d'objets matériels en mouvement (donc pas en équilibre) sur un plan incliné. Cependant, les

laboratoires visent également la construction de nouveaux savoirs conceptuels comme les concepts de distance, de vitesse et d'accélération et les modèles du mouvement rectiligne uniforme (MRU) et du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA).

La troisième finalité éducative est la mobilisation ou la construction de savoirs procéduraux (habiletés d'investigation scientifique, méthode scientifique, etc.) (N=20). Cette finalité est étroitement associée à la seconde finalité, car la mobilisation/construction des savoirs conceptuels se fait en concomitance avec la mobilisation/construction des savoirs procéduraux. Sur le plan de la mobilisation des savoirs procéduraux, les élèves doivent par exemple être en mesure d'appliquer la méthode de calcul d'une vitesse de réaction vue en chimie dans le contexte de la cinématique en vue de calculer des vitesses instantanées et des vitesses moyennes dans un graphique distance-temps. Il s'attend également à ce que les élèves puissent calculer des forces et construire des systèmes de forces dans diverses situations expérimentales. Mais au-delà de ces exemples disciplinaires précis, c'est aussi « l'application stricte de la méthode de recherche scientifique » dans un nouveau contexte qui est particulièrement visée par l'enseignant. Sur le plan de la construction des nouveaux savoirs procéduraux, plusieurs exemples sont rapportés par l'enseignant. Il s'agit notamment de : la conception d'un protocole de laboratoire qui nécessite l'identification de facteurs expérimentaux à explorer ; l'appropriation de matériels de laboratoire jamais encore utilisés comme les sondes photoélectriques ; la construction de nouvelles relations mathématiques (distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps) associées à divers mouvements d'objets matériels, que ce soit dans leur registre algébrique ou vectoriel.

La quatrième finalité éducative est le développement de certaines compétences transversales comme faire des recherches et communiquer des idées à ses pairs. Si le développement de la compétence à faire des recherches théoriques sur le phénomène qu'ils doivent explorer au sein de leur laboratoire est rapporté par l'enseignant, c'est la compétence à communiquer tout le processus de leur laboratoire qui est particulièrement mis en exergue par l'enseignant. Il s'agit pour les élèves de préparer un véritable cours de physique dans lequel ils présentent plusieurs informations à leurs pairs : buts, facteurs expérimentaux retenus, hypothèses explicatives relatives au phénomène étudié, principaux résultats obtenus, comparaison entre les résultats obtenus et résultats attendus, etc. Cette communication doit permettre aux autres élèves de la classe de comprendre le

phénomène étudié en mettant en évidence les concepts et les modèles du mouvement (MRU, MRUA, mouvement balistique, etc.) en jeu. Cette communication doit également contenir une proposition de situations d'application qui permet aux élèves de déployer les modèles vus dans d'autres contextes. Les dernières séances de la démarche de modélisation sont exclusivement dédiées à ce moment d'apprentissage collectif où la responsabilité du savoir est partagée avec l'enseignant et les pairs de la classe.

La cinquième finalité éducative est l'acquisition de savoirs épistémologiques (N=4). Il s'agit d'amener les élèves à se donner une compréhension d'un modèle, d'une démarche scientifique ou de la science de manière plus générale. À ce sujet, l'enseignant souligne l'importance de distinguer entre un modèle mathématique et un modèle en physique. Contrairement au modèle mathématique, le modèle en physique est une représentation simplifiée d'un phénomène construit sur la base de données expérimentales, et par conséquent, il ne peut qu'être approché par une représentation mathématique quelconque.

La sixième finalité éducative est le développement d'attitudes sociales. Il s'agit, d'une part, de rendre les élèves de plus en plus autonomes dans la planification et la réalisation des laboratoires. Il s'agit, d'autre part, de développer chez eux des attitudes de coopération tout au long de la démarche de modélisation, de la conception des protocoles de laboratoire à la communication des résultats en passant par le recueil des données et la modélisation des phénomènes.

Tableau 44 : Finalités éducatives associées à l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en physique selon l'enseignant 2

Il est utile que les élèves recourent aux modèles et à la démarche de modélisation en physique parce que cela leur permet de...
<b>1. comprendre ou conceptualiser des phénomènes de la physique (N=25)</b>
P : J'ai 8 postes dans le local. <b>J'ai 8 mouvements différents. J'ai des MRU. J'ai des MRUA. J'ai des mouvements composés.</b> J'ai toute sorte de choses à l'intérieur de ça <b>alors il faut qu'ils soient capables de comprendre comment ça fonctionne, comment ça marche, qu'est-ce qu'il l'influence, est-ce qu'il y a des choses qui ne l'influence pas</b> , donc être capable de travailler là-dedans et ensuite ils doivent être capable de me l'expliquer. (Ent pré 1, ens 2)
P : Chaque équipe travaille une thématique, ils développent une thématique, ils la développent, ils se conçoivent des protocoles en fonction de cette thématique-là. Il y a des protocoles que je leur oblige et il y a des protocoles qui sont optionnels donc qu'eux vont développer. Et en fin de compte <b>ils devraient devenir des espèces de</b>

**spécialistes dans le domaine.** Il faut qu'ils fassent une recherche théorique en lien avec ça et le but ultime c'est qu'ils soient capables de présenter au groupe leurs mouvements. (Ent pré 1, ens 2)

P : Ils ont à peu près tous la même démarche étant donné qu'ils ont à prime à bord tous un volet expérimental qui les amène à retrouver c'est quoi mes références théoriques donc **ils comparent après ils analysent afin de se donner une compréhension de leurs phénomènes.** Donc ce sont vraiment des labs qui se ressemblent dans cette fameuse structure-là oui. (Ent pré 3, ens 2)

## **2. favoriser la mobilisation ou la construction de savoirs conceptuels : concepts, modèles, lois, etc. (N=23)**

P : Les autres concepts qui vont se rajouter lorsqu'on parle de distance, vitesse, accélération et compagnie, ça, c'est beaucoup plus récent, c'est beaucoup plus nouveau. Je ne les ai absolument pas abordés en préalable donc je vais leur donner juste un point de départ, ils vont avoir un point de départ comment on calcule une vitesse, comment on calcule une accélération, mais ça va être un préambule. J'ai très très peu développé parce que je veux qu'ils le voient par l'intermédiaire de leur démarche. (Ent pré 1, ens 2)

P : Lorsqu'ils vont arriver avec les propulsions et tout là, les forces sur les plans inclinés il faut vraiment qu'ils **travaillent leurs systèmes de forces, il faut vraiment qu'ils soient capables de travailler.** On a travaillé les systèmes de forces, mais on les a travaillées à l'équilibre. Là il n'est plus en équilibre ce qui fait que là comment on fait si ce n'est pas en équilibre ? Oups petite démarche en mathématiques encore là supplémentaire **nouveau modèle qui va apparaître.** Là on rentre en dynamique et à ce moment-là il va aller chercher ces liens-là. (Ent pré 3, ens 2)

P : Donc au niveau mathématique c'est sûr que lorsqu'on est arrivé moi **le projet il est placé à un endroit très précis dans l'année justement parce que la majorité de mes modèles mathématiques ont été préalablement travaillés** donc toute ma structure de lab, toute ma structure de graphique, toute ma structure, les fonctions mathématiques on en a vu 7 ou 8 avec l'optique et le début de la mécanique donc toutes celles qui sont supposées d'arriver normalement en mécanique, ils les ont travaillées et en lien avec le prof de math celles que je ne peux pas appliquer en optique ici alors le prof de math les a travaillées (...) donc lorsqu'on tombe dans les exponentielles par exemple ils vont tomber également en math... Je sais qu'ils ont tous vu les équations par parties donc les graphiques par parties (...) Donc, ce sont toutes des choses que je vais réutiliser alors on fait un petit lien entre ça. Il y a beaucoup de modèles qui ont été préalablement travaillés et vus, mais vus dans d'autres contextes que ceux qu'ils ont actuellement et c'est pour ça maintenant que c'est de travailler le lien. Regarde on l'a vu, on l'a travaillé. Regarde ton contexte maintenant. (Ent post 4, ens 2)

## **3. favoriser la mobilisation ou la construction de savoirs procéduraux : habiletés d'investigation scientifique, méthode scientifique, etc. (N=20)**

P : Ils devraient normalement être capables (...) **de bâtir un schéma de forces** de leur organisation alors les schémas de forces et les forces qui sont là-dedans et peut-être même qui seraient déjà capables **de calculer certaines forces déjà à l'intérieur à partir des paramètres qui se sont donnés au niveau de leur expérience** alors au niveau des forces je m'attends à ce qu'ils aient une bonne vision de ce qu'ils ont à faire. (Ent pré 1, ens 2)

P : Donc tu vois si j'embarque en chute libre (...) **je leur demande de trouver des relations entre la distance et le temps** d'un corps en chute libre, des **relations entre la vitesse et le temps** de leur mobile, je les amène à l'**accélération** qu'ils ont de leur corps en chute libre, je les amène à **calculer l'accélération moyenne** de leur corps (...) Et ensuite, je leur demande qu'ils **me choisissent un facteur** qui pourront faire varier qu'ils pensent qui pourra avoir un effet sur la modification de l'accélération d'un corps et c'est là qu'ils vont développer un **protocole supplémentaire, ils vont aller le vérifier, ils vont me le chiffrer puis ils vont le présenter leurs résultats par la suite.** (Ent pré 1, ens 2)

P : Ah ce qui est essentiel pour moi c'est la réalité de la science, **l'application stricte de la méthode de recherche scientifique, méthode de recherche scientifique qui est extrêmement importante,** puis de les plonger le plus possible dans la réalité de la science. Il n'y a pas personne qui va découvrir quoi que ce soit une fois le lab terminé. Ça n'existe pas. C'est 20 ans, 30 ans, 40 ans puis des fois on a ramassé après 30 ans les données qu'un autre avait faites il y a 50 ans plus tôt puis on a continué. C'est ça la réalité. **Ce qu'il faut comprendre c'est qu'on essaie des choses, on a oublié de tenir compte de tels ou tels paramètres, il faut être capable de revenir sur ce qu'on fait pour être capable de dire je le referais comment.** Ça, je veux leur inculquer ça et j'utilise beaucoup ce projet-là pour le faire (...) Je pense que c'est extrêmement important. (Ent pré 1, ens 2)

#### 4. favoriser le développement de compétences transversales : résoudre des problèmes, communiquer, faire des recherches, etc. (N=15)

P : Il y a une modélisation théorique qu'il faut qu'il se fasse. **Il faut qu'ils aillent chercher des références théoriques** alors ça il faut qu'il la fasse et je te dirais qu'avec le groupe la majorité des équipes il y en a un gros pas de fait déjà. Déjà après les premiers cours, **il y avait plusieurs éléments de recherche qui ont été faits là-dessus** alors ça leur prend leur référentiel. Ça leur prend leur base de comparaison à savoir si ça marche ou pas. (Ent pré 3, ens 2)

P : Donc **ces périodes de présentation visent vraiment pour eux autres l'enseignement de leurs concepts**. Ça veut dire que **la majorité des principes de base en physique normalement devraient être enseignés et la majorité des principes mathématiques derrière ces fondements-là devraient être enseignés également donc si on s'en va en MRU si on s'en va MRUA normalement on devrait être capable de sortir tous les modèles de physique derrière** et ce qui sous-tend ça évidemment toute la base mathématique à quoi je m'attends avec eux autres là les questionnements commencent déjà à sortir. (Ent pré 5, ens 2)

#### 5. favoriser l'acquisition de savoirs épistémologiques : compréhension d'un modèle, d'une démarche scientifique, etc. (N=4)

P : L'autre difficulté qu'ils ont c'est qu'**en mathématiques ça marche toujours super bien**. Ils font une fonction parabolique hey regarde ils font ça sur la petite calculatrice wow ce n'est pas ma réalité. Le **modèle est parfait. En sciences, ce n'est pas ça**. Là, les jeunes regardaient leurs graphiques, bien non ce n'est pas une parabole ça là. Puis là encore en secondaire 5 ils vont me tracer ça au point à point ce qui fait que là ils regardent ça puis... Bien ils n'ont jamais fait. Dans les livres de math, c'est toujours beau. **Ils ne connaissent pas ça un modèle issu de données expérimentales et ça devrait être la base parce que c'est ça la réalité**. Moi je me tue à leur dire qu'**une fonction qui arrive parfaitement ça n'existe pas**. Il y a toujours un paramètre qui va venir influencer quelque part. Bien en math on ne travaille que des contextes parfaits et ça, je trouve ça « plate » (...) (Ent post 6, ens 2)

P : C'est ça que je travaille avec eux autres alors il y a une partie théorique, il y a une partie expérimentale, fusion des deux et en fait **j'utilise le lab pour qu'ils m'amènent mes concepts théoriques et en le faisant ça leur permet de voir aussi l'effet que j'appelle l'effet réalité : une équation dans un livre versus appliqué dans un contexte**, bien dépendant des conditions de ton contexte, elle va peut-être marcher, mais tu vas peut-être être bien loin aussi donc c'est ce lien réel que je tiens toujours à avoir avec eux autres donc **le concept réel je ne veux pas qu'ils se ramassent avec des labs où tout fonctionne bien. Ce n'est pas ma réalité** alors c'est ça que je vise en avant (Ent pré 5, ens 2)

#### 6. favoriser le développement d'attitudes sociales : autonomie, ouverture d'esprit, coopération, etc. (N=3)

P : Toute la structure [de la démarche scientifique], l'organisation, veut veut pas, **amener le jeune à être un peu plus autonome en lab** puis à comprendre ce qui se passe ça prend quand même un certain temps ce qui fait que rendu au mois de mars de même, mars-avril, là le timing est bon. (Ent pré 1, ens 2)

P : **C'est vraiment un travail coopératif**. Chaque équipe développe une thématique. Ils se conçoivent des protocoles en fonction de cette thématique-là. Il y a des protocoles que je leur oblige et il y a des protocoles qui sont optionnels donc qu'eux vont développer. Et en fin de compte ils devraient devenir des espèces de spécialistes dans le domaine. Il faut qu'ils fassent une recherche théorique en lien avec ça et le but ultime c'est qu'ils soient capables de présenter au groupe leurs mouvements. (Ent pré 1, ens 2)

P : **Pendant les présentations, c'est également un travail coopératif**. Il y en a qui vont poser des questions, il y en a qui ne sauront pas les réponses, mais il y en a d'autres dans la classe qui vont connaître les réponses alors on va aller chercher ces réponses-là, on va les appliquer à leur contexte. Bref, **c'est de travailler de façon très très très coopérative tout le temps du début jusqu'à la fin**. (Ent pré 5, ens 2)

## 7. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2

### 7.1 La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle macroscopique

Sur le plan macroscopique, la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 s'étale sur 14 séances. Elle est structurée autour de 7 groupes de savoirs : la position, la distance parcourue, la vitesse (vitesse, vitesse instantanée et moyenne), l'accélération (accélération, accélération instantanée et moyenne), le mouvement rectiligne uniforme, le mouvement rectiligne uniformément accéléré et le mouvement balistique (**figure 91**). Le nombre de facettes de savoir et la fréquence d'apparition totale des facettes pour les groupes de savoirs qui relèvent du domaine de la cinématique indiquent que cette séquence d'enseignement met un accent fort sur les trois modèles du mouvement : le mouvement rectiligne uniforme (23 facettes ; N=145), le mouvement rectiligne uniformément accéléré (65 facettes ; N=320) et le mouvement balistique (49 facettes ; N=155). Dans cette séquence, les concepts de position, de distance parcourue, de vitesse, d'accélération et de vecteurs n'ont pas été introduits au préalable, mais plutôt dans le contexte des laboratoires.

Cette séquence d'enseignement met en jeu une grande diversité de laboratoires dont la plupart porte sur le mouvement rectiligne uniformément accéléré : Lab Mouvement sur des plans inclinés descendants avec influence du milieu (air/eau) ; Lab Mouvement en chute libre ; Lab Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale ; Lab Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale ; Lab Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale. Un seul laboratoire porte sur le mouvement rectiligne uniforme, sur le mouvement balistique ou encore sur le mouvement pendulaire<sup>110</sup>. On remarque que la mise en œuvre de ces laboratoires entraîne la construction ou la mobilisation d'un nombre important de facettes de savoir pour les trois modèles du mouvement.

---

<sup>110</sup> Ce dernier laboratoire n'ayant pas fait l'objet d'une analyse à l'échelle microscopique, car il met en jeu un modèle du mouvement autre que celui du MRU, du MRUA ou du MB.



Tous ces laboratoires s'inscrivent au sein d'une démarche de modélisation structurée autour des quatre phases (Problématiser, Planifier, Investiguer, Conceptualiser et déployer) retenues dans notre cadre conceptuel, et avec pour chacune de ces phases des tâches réalisées principalement par les élèves.

Dans la phase *Problématiser* mise en œuvre dans la séance 1 ([annexe 18, tableau 1 ; annexe 24](#)), les élèves sont appelés à s'approprier une situation empirique en lien avec un phénomène de la physique. Comme tous les laboratoires nécessitent un recueil de données au moyen de sondes informatiques, l'un des enjeux importants dans cette phase de problématisation est la prise en charge graduelle par les élèves du matériel informatique à leur disposition (fonctionnalité de l'interface du logiciel et des sondes photoélectriques Pasco).

Dans la phase *Planifier* mise en œuvre dans les séances 1 et 2 ([annexe 18, tableaux 1 et 2 ; annexe 24](#)), les élèves sont appelés à concevoir un protocole de laboratoire qui comporte une liste de matériel, des buts à atteindre, des facteurs expérimentaux à explorer et des hypothèses explicatives relatives au phénomène à l'étude. Le degré d'ouverture des protocoles varie d'un laboratoire à l'autre en ce sens qu'ils comportent tous des buts obligatoires et des buts optionnels à atteindre, de même que des facteurs expérimentaux obligatoires et des facteurs expérimentaux optionnels à explorer.

Dans la phase *Investiguer* mise en œuvre de la séance 3 à la séance 7 ([annexe 18, tableaux 3 à 7 ; annexe 24](#)), les élèves sont appelés à : recueillir des données à l'aide des outils (ex. : ordinateurs, tablettes, etc.) et instruments de mesure (ex. : sondes Pasco) à leur disposition ; calculer des grandeurs physiques (notamment des positions, distances, vitesses instantanées, vitesses moyennes, accélérations instantanées, accélérations moyennes) ; modéliser mathématiquement leur phénomène à l'aide de représentations diverses (tabulaires, algébriques, graphiques et vectorielles) ; identifier des facteurs expérimentaux qui ont un effet ou non sur le phénomène à l'étude. La modélisation des phénomènes impliquant les modèles du MRU, du MRUA et du MB nécessite la mobilisation de savoirs dans les domaines de la cinématique et de la dynamique, et plus particulièrement le recours à trois variables du mouvement : la distance parcourue, la vitesse et l'accélération. Ce sont ces variables du mouvement qui permettent la construction des relations

mathématiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps dans les registres algébriques et graphiques et le calcul de diverses grandeurs physiques comme la vitesse instantanée, la vitesse moyenne, l'accélération instantanée et l'accélération moyenne.

Dans la phase *Conceptualiser et déployer* mise en œuvre de la séance 8 à la séance 14 (**annexe 18, tableaux 8 à 14 ; annexe 24**), les élèves sont appelés à présenter les objectifs et conditions de réalisation de leur laboratoire (buts, facteurs expérimentés, hypothèses explicatives initiales, etc.), à présenter les principaux résultats obtenus en expliquant le comportement de leur phénomène (facteurs qui l'influencent ou non) à l'aide d'un modèle, à évaluer les résultats obtenus en comparant le modèle expérimental (résultats obtenus expérimentalement) avec le modèle théorique (résultats attendus) et expliquer les écarts, à proposer des pistes d'amélioration du protocole en vue de rapprocher les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques et à appliquer les modèles construits dans de nouveaux contextes.

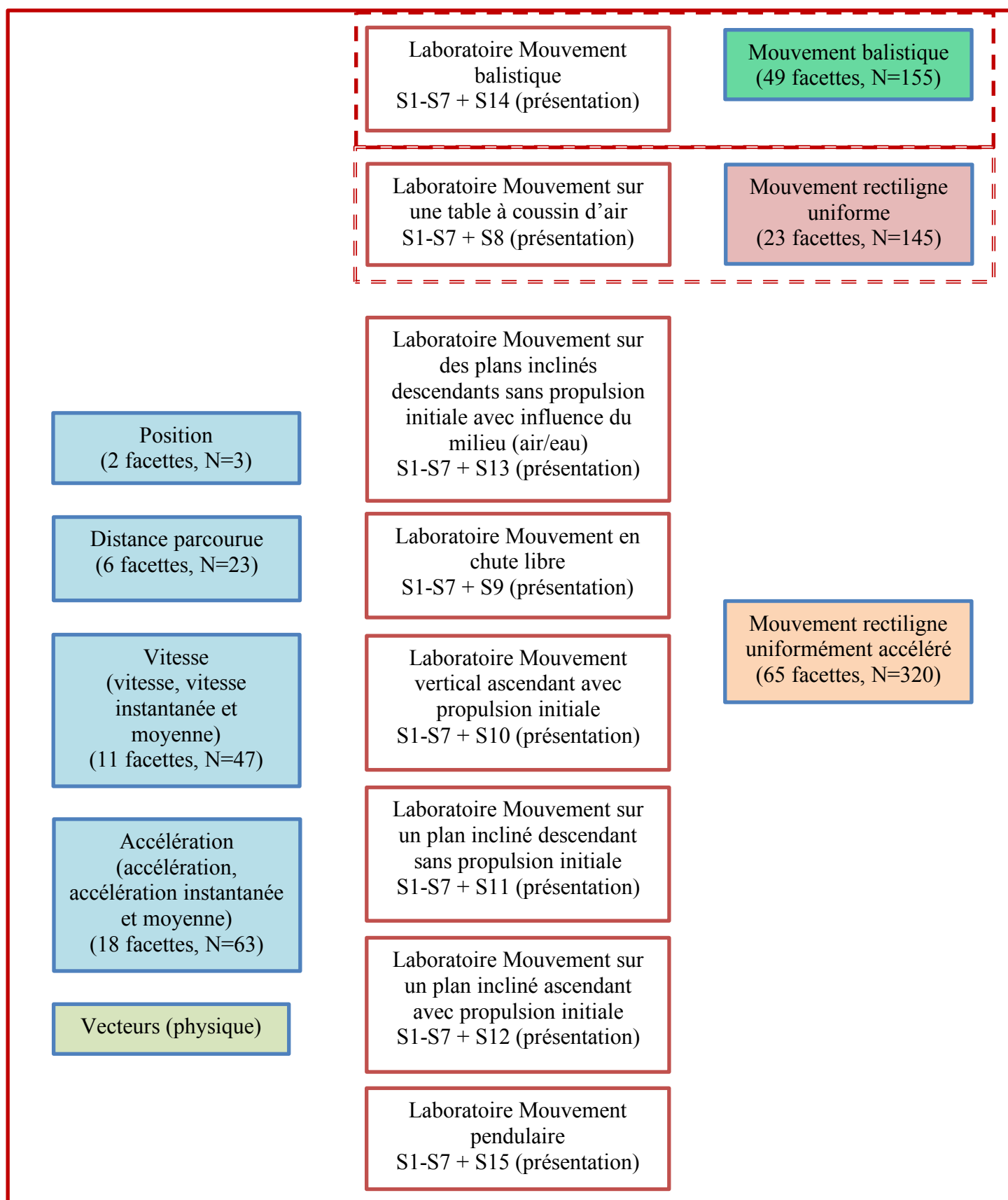


Figure 91- Réseau des savoirs en relation avec les laboratoires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

## 7.2 La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle mésoscopique

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons une analyse de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 en mettant en évidence la manière avec laquelle celle-ci est mise en œuvre du point de vue de cinq indicateurs d'ordre mésoscopique : les thèmes et sous-thèmes disciplinaires, les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les phases de la démarche de modélisation, les ressources didactiques et les modalités d'organisation de la classe.

### 7.2.1 *Les thèmes disciplinaires*

La séquence d'enseignement de l'enseignant 2 a duré 16 h 37 min 7 s (**tableau 45**). Elle s'étale sur 14 séances comme le montrent les synopsis de cette séquence<sup>111</sup>. Elle est découpée en 5 thèmes disciplinaires<sup>112</sup> couvrant 4 modèles du mouvement : le mouvement rectiligne uniforme (MRU) (thème 1) ; le mouvement rectiligne uniformément accéléré (thème 2) ; le mouvement rectiligne uniforme ou le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRU ou MRUA) (thème 3) ; le mouvement balistique qui combine à la fois le MRU et le MRUA (MRU + MRUA) (thème 4) ; et le mouvement pendulaire (thème 5). C'est de loin le thème 2-MRUA qui occupe la plus grande proportion du temps, soit près de la moitié du temps de cette séquence (49 % du temps). Ce thème est couvert dans la plupart des laboratoires : le lab A-Mouvement en chute libre, le lab B-Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale ; le lab D-Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale ; le lab E-Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale ; et le lab F-Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion initiale avec influence du milieu (air/eau). Les thèmes 1, 3 et 4 occupent quant à eux une proportion de temps beaucoup plus faible de cette séquence, avec environ chacun 14 % du temps. Ces derniers sont également couverts essentiellement dans certains laboratoires : le thème 1 est abordé dans le lab C-Mouvement sur une table à coussin d'air ; le thème 3 est abordé dans le lab F-Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion initiale avec influence du milieu (air/eau) ; le thème 4 est abordé dans le lab G-Mouvement balistique. Quant au thème 5 qui occupe la proportion

---

<sup>111</sup> Nous décrivons plus loin ces synopsis.

<sup>112</sup> Le découpage des thèmes et sous-thèmes disciplinaires proposé est celui de l'enseignante 1.

de temps la plus faible (2,8 % du temps) de cette séquence est abordé uniquement dans le lab H-Mouvement pendulaire. Enfin, la gestion du travail (aucun thème) occupe également une proportion de temps relativement faible (7,8 % du temps) de cette séquence. La gestion du travail se fait essentiellement au début des séances et consiste en des explications générales sur le déroulement des laboratoires.

Les thèmes disciplinaires sont tous couverts en alternance dans les 7 premières séances associées aux moments de problématisation, de planification et de réalisation des laboratoires, soient dans les épisodes 1 à 183 ([annexe 18, tableaux 1 à 7 ; annexe 24](#)). Dans les 7 dernières séances associées aux moments de conceptualisation et de déploiement du modèle (épisodes 184 à 227) ([annexe 18, tableaux 8 à 14 ; annexe 24](#)) dans lesquelles les élèves présentent leur laboratoire respectif, les thèmes sont essentiellement couverts de manière spécifique : le thème 1-MRU est couvert lors de la séance 8 ; le thème 2-MRUA est couvert lors des séances 9 à 12 ; les thèmes 3-MRU ou MRUA est couvert lors de la séance 13 ; et le thème 4-Mouvement balistique est couvert lors de la séance 14.

Tableau 45 : Thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Thèmes	Temps	Fréquence relative (%)
Gestion du travail (aucun thème)	1 h 17 min 58 s	7,8
Thème 1 : Mouvement rectiligne uniforme (MRU)	2 h 12 min 53 s	13,4
Thème 2 : Mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA)	8 h 8 min 42 s	49
Thème 3 : MRU ou MRUA	2 h 8 min 45 s	12,9
Thème 4 : Mouvement balistique (MRU et MRUA)	2 h 20 min 44 s	14,1
Thème 5 : Mouvement pendulaire	28 min 5 s	2,8
Total	16 h 37 min 7 s	100

### 7.2.2 Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires

Soulignons d'entrée de jeu que dans cette séquence, nous distinguons 6 contextes de traitement des thèmes disciplinaires.

Le contexte 1-laboratoires : explications générales qui consiste en des explications générales sur le déroulement des laboratoires (ex. : éléments à prendre en compte dans le recueil des données, exigences relatives à rédaction d'un rapport de laboratoire, etc.).

Le contexte 2-les laboratoires-explications spécifiques qui consiste en des explications spécifiques sur le déroulement des laboratoires (ex. : explications sur des montages ou sur le fonctionnement de dispositifs de recueil des données particuliers).

Le contexte 3-laboratoires : réalisation qui couvre autant les moments associés à la conception (matériel, buts, facteurs expérimentaux, hypothèses explicatives, etc.) qu'à la mise en œuvre (recueil des données à l'aide d'outils et d'instruments de mesure, calcul de grandeurs physiques, modélisation mathématique des phénomènes à l'aide de divers registres de représentation sémiotique, identification des effets de facteurs expérimentaux, etc.) des protocoles.

Le contexte 4-laboratoires : présentation qui consiste en : la présentation des objectifs et conditions de réalisation (buts, facteurs expérimentés, hypothèses explicatives initiales, etc.), la présentation des résultats saillants (explication du comportement d'un phénomène, des facteurs qui l'influencent ou non, de son modèle physique sous-jacent, etc.), l'évaluation des résultats obtenus (comparaison entre le modèle expérimental et le modèle théorique et explication des écarts entre ces modèles), la proposition de pistes d'amélioration du protocole en vue de rapprocher les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques, etc.

Le contexte 5-exercisation qui consiste en des moments de réalisation ou de correction d'exercices.

Le contexte 6-théorie qui consiste en des moments de théorisation pris en charge par les élèves ou par l'enseignant.

Le **tableau 46** présentant les contextes de traitement des thèmes disciplinaires de cette séquence d'enseignement montre de manière générale que les contenus disciplinaires de cinématique et de dynamique sont essentiellement traités à travers les laboratoires. Dans un peu plus de 80 % du temps de cette séquence, les élèves sont engagés dans la réalisation ou dans la présentation de leur laboratoire. Comme le montre ce tableau, deux contextes de traitement des thèmes disciplinaires sont prédominants dans cette séquence d'enseignement, à savoir : le

contexte 3-laboratoires : réalisation et le contexte 4-laboratoires : présentation qui occupent respectivement 43,4 % et 24,3 % du temps de cette séquence. Les contextes de traitement des thèmes disciplinaires 1 et 2-explications générales ou spécifiques des laboratoires (respectivement 8,4 % et 5 % du temps), le contexte 5-exercisation (12,6 %) ainsi que le contexte 6-théorie (6,3 % du temps) prennent des proportions de temps beaucoup plus petites de cette séquence. Cette séquence d'enseignement incite fortement les élèves à s'engager intellectuellement dans le recueil et l'analyse de données empiriques en lien avec l'un ou l'autre des 4 modèles traités : le MRU, le MRUA, le mouvement balistique (MB) et le mouvement pendulaire (MP).

En ce qui concerne spécifiquement les différents contextes de traitement des thèmes disciplinaires, nous relevons, par ailleurs, que l'enseignant a accordé une proportion de temps plus grande pour donner des explications spécifiques sur les dispositifs de recueil des données de deux laboratoires : le lab D-Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale (3,2 % du temps) et le lab E : Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale (3,9 % du temps) comparativement aux autres laboratoires où ces explications prennent au maximum 0,2 % du temps de la séquence.

Si nous nous centrons sur les interventions menées par l'enseignant auprès des élèves dans les moments où ils réalisent leur laboratoire, nous remarquons des différences relativement importantes quant au degré d'accompagnement de l'enseignant. Si, dans la plupart des laboratoires (B, C, D, E et F), il accorde environ 6 % du temps de la séquence pour accompagner les élèves, dans le lab A-Mouvement en chute libre sans propulsion initiale et le lab B-Mouvement pendulaire sans propulsion initiale, il accorde la moitié moins de temps, soit environ 3 % du temps de la séquence.

Le temps accordé à la présentation des laboratoires est relativement le même pour l'ensemble des laboratoires, soit environ 4 % de la séquence. Par contre, les occasions pour l'exercisation lors de la présentation des laboratoires ne sont pas les mêmes. Des moments d'exercisation sont particulièrement offerts dans les laboratoires A, B, D et G. Environ 3 % du temps de la séquence est accordé à des moments d'exercisation en grand groupe dans chacun de ces laboratoires.

Tableau 46 : Contextes de traitement des thèmes disciplinaires recouverts dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus)

Contextes	Temps	Fréquence relative (%)
<b>1. Laboratoires : explications générales</b>	<b>1 h 24 min 20 s</b>	<b>8,4</b>
<b>2. Laboratoires : explications spécifiques</b>	<b>49 min 7 s</b>	<b>5</b>
Lab A : Mouvement en chute libre sans propulsion initiale	1 min 13 s	0,1
Lab B : Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale	2 min 27 s	0,2
Lab C : Mouvement sur une table à coussin d'air	2 min 39 s	0,2
Lab D : Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale	33 min 52 s	3,2*
Lab E : Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale	4 min 1 s	3,9*
Lab F : Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu	1 min 43 s	0,1
Laboratoire G : Mouvement balistique	2 min 1 s	0,2
Laboratoire H : Mouvement pendulaire sans propulsion initiale	1 min 12 s	0,1
<b>3. Laboratoires : réalisation (recueil de données et rédaction du rapport de laboratoire)</b>	<b>7 h 15 min 34 s</b>	<b>43,4*</b>
Lab A : Mouvement en chute libre sans propulsion initiale	33 min 47 s	3,2
Lab B : Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale	1 h 0 min 49 s	6
Lab C : Mouvement sur une table à coussin d'air	1 h 9 min 18 s	6,9
Lab D : Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale	57 min 47 s	5,7
Lab E : Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale	1 h 5 min 14 s	6,5
Lab F : Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu	1 h 3 min 6 s	6,2
Laboratoire G : Mouvement balistique	1 h 8 min	6,8
Laboratoire H : Mouvement pendulaire sans propulsion initiale	26 min 53 s	2,7
<b>4. Laboratoires : présentation (protocole, fonctionnement, résultats du rapport de laboratoire et éléments théoriques, etc.)</b>	<b>4 h 3 min 22 s</b>	<b>24,3*</b>
Lab A : Mouvement en chute libre sans propulsion initiale	34 min 43 s	3,5
Lab B : Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale	32 min 3 s	3,2
Lab C : Mouvement sur une table à coussin d'air	45 min 38 s	4,5
Lab D : Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale	44 min 23 s	4,4
Lab E : Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale	46 min 30 s	4,6
Lab F : Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu	36 min 09 s	3,6
Laboratoire G : Mouvement balistique	43 min 55 s	4,4
Laboratoire H : Mouvement pendulaire sans propulsion initiale	-	-
<b>5. Exercisation (incluant correction)</b>	<b>2 h 6 min 58 s</b>	<b>12,6</b>
Lab A : Mouvement en chute libre sans propulsion initiale	27 min 30 s	2,7
Lab B : Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale	31 min 02 s	3,1
Lab C : Mouvement sur une table à coussin d'air	8 min 39 s	0,8
Lab D : Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale	21 min 3 s	2,1
Lab E : Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale	11 min 57 s	1,2
Lab F : Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu	-	-
Laboratoire G : Mouvement balistique	26 min 48 s	2,6
Laboratoire H : Mouvement pendulaire sans propulsion initiale	-	-
<b>6. Théorie</b>	<b>1 h 3 min 5 s</b>	<b>6,3</b>
Total	16 h 37 min 7 s	100



### 7.2.3 Les phases de la démarche de modélisation

Comme nous l'avons souligné dans la dimension conceptuelle de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2, l'ensemble des 14 séances de cette séquence d'enseignement se déploie dans le cadre d'une démarche de modélisation à travers quatre phases (problématiser, planifier, investiguer, conceptualiser et déployer) décrites dans la première colonne du **tableau 47**. La phase *Problématiser* occupe une faible proportion du temps (5 % du temps) de cette séquence. Dans cette phase, les élèves sont appelés à s'approprier une situation empirique en lien avec un phénomène de la physique ainsi que le matériel de laboratoire en faisant diverses manipulations exploratoires. Cette phase de problématisation est amorcée à la séance 1 par des explications générales de la part de l'enseignant sur le projet global proposé aux élèves (épisodes 1 et 2, 11 à 13) et se poursuit par des explications spécifiques de la part de l'enseignant sur ces 8 laboratoires (épisodes 3 à 10) dont le mouvement des objets matériels peut être modélisé par l'un ou l'autre des 4 modèles suivants : le MRU, le MRUA, le mouvement balistique et le mouvement pendulaire. La phase *Planifier* occupe également une faible proportion du temps (9,4 % du temps) de cette séquence. Dans cette phase, les élèves sont appelés à concevoir leur protocole de laboratoire dont le degré d'ouverture est variable. Cette phase est amorcée à la fin de la séance 1 (épisodes 14 à 21) et se poursuit tout au cours de la séance 2, (épisodes 22 à 50). Quant à la phase *Investiguer* mise en œuvre de la séance 3 à la séance 7 (épisodes 51 à 183), elle occupe une proportion de temps (36,3 % du temps) importante de cette séquence. Dans cette phase d'investigation, les élèves sont appelés à recueillir des données à l'aide des outils et instruments de mesure, calculer des grandeurs physiques (notamment des positions, distances, vitesses instantanées, vitesses moyennes, accélérations instantanées, accélérations moyennes), modéliser mathématiquement des phénomènes et identifier des facteurs expérimentaux qui ont un effet ou non sur le phénomène à l'étude. Enfin, la démarche de modélisation se clôture par la phase *Conceptualiser et déployer* qui occupe également une proportion de temps (49,3 % du temps) importante de cette séquence. Elle s'étend de la séance 8 à la séance 14, soit de l'épisode 184 à l'épisode 227 et se réalise dans des contextes de traitement des thèmes disciplinaires qui alternent des explications générales et des moments de théorisation par l'enseignant avec des présentations de laboratoire et des moments d'exercisation pris en charge par les élèves.

Tableau 47 : Laboratoires et épisodes couverts en lien avec la démarche de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous les laboratoires confondus)

Phases de la démarche de modélisation	Temps	Fréquence relative (%)
<b>Problématiser</b> Laboratoires A, B, C, D, E, F, G et H Séance 1, épisodes 1 et 2 (laboratoire-explications générales) Séance 1, épisodes 3 à 10 (laboratoire-explications spécifiques) Séance 1, épisodes 11 à 13 (laboratoire-explications générales)	50 min 20 s	5
<b>Planifier</b> Laboratoires A, B, C, D, E, F, G et H Séance 1, épisodes 14 à 21 (laboratoire-réalisation) Séance 2, épisodes 22 à 50 (laboratoire-réalisation)	1 h 33 min 48 s	9,4
<b>Investiguer</b> Laboratoires A, B, C, D, E, F, G et H Séance 3, épisodes 51 (laboratoire-explications générales) Séance 3, épisodes 52 à 93 (laboratoire-réalisation) Séance 4, épisodes 94 (laboratoire-explications générales) Séance 4, épisodes 95 à 130 (laboratoire-réalisation) Séance 5, épisodes 131 (laboratoire-explications générales) Séance 5, épisodes 132 à 157 (laboratoire-réalisation) Séance 6, épisodes 158 (laboratoire-explications générales) Séance 6, épisodes 159-177 (laboratoire-réalisation) Séance 7, épisodes 178 (laboratoire-explications générales) Séance 7, épisodes 179-183 (laboratoire-réalisation)	6 h 4 min 4 s	36,3*
<b>Conceptualiser et déployer</b> <u>Lab C-Mouvement sur table à coussin d'air</u> Séance 8, épisodes 184 (laboratoire-explications générales) Séance 8, épisodes 185, 186 et 188 (laboratoire-présentation) Séance 8, épisode 187 (laboratoire-exercisation) Séance 8, épisode 189 (laboratoire-théorie menée par P) <u>Lab A-Mouvement en chute libre</u> Séance 9, épisodes 190 (laboratoire-explications générales) Séance 9, épisodes 191-192 (laboratoire-présentation) Séance 9, épisode 193 et 195 (laboratoire-exercisation) Séance 9, épisode 194 et 196 (laboratoire-théorie menée par P) <u>Lab B- Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale</u> Séance 10, épisodes 197 (laboratoire-explications générales) Séance 10, épisodes 198-200 (laboratoire-présentation) Séance 10, épisode 201 (laboratoire-exercisation) <u>Lab D- Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale</u> Séance 11, épisodes 202 (laboratoire-explications générales) Séance 11, épisodes 203-207 (laboratoire-présentation) Séance 11, épisode 208 (laboratoire-exercisation) Séance 11, épisode 209 (laboratoire-théorie menée par P) <u>Lab E- Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale</u> Séance 12, épisodes 210 (laboratoire-explications générales) Séance 12, épisodes 211-212. 214-215 (laboratoire-présentation) Séance 12, épisode 213 et 217 (laboratoire-exercisation) Séance 12, épisode 216 (laboratoire-théorie menée par P) <u>Lab F-Mouvement sur plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu</u> Séance 13, épisodes 218 (laboratoire-explications générales) Séance 13, épisodes 219-220 (laboratoire-présentation) Séance 13, épisode 221 (laboratoire-théorie menée par les élèves) Séance 13, épisode 221 (laboratoire-théorie menée par P) <u>Lab G- Mouvement balistique</u> Séance 14, épisodes 223 (laboratoire-explications générales) Séance 14, épisodes 224-226 (laboratoire-présentation) Séance 14, épisode 227 (laboratoire-exercisation)	8 h 15 min 5 s	49,3*
Hors démarche	-	-
Total	16 h 37 min 7 s	100

#### 7.2.4 Les ressources didactiques utilisées

Le **tableau 48** présente les ressources didactiques utilisées par l'enseignant 2 dans la séquence d'enseignement (tous thèmes confondus). Ce tableau montre que 8 ressources didactiques font l'objet d'une utilisation exclusive par l'enseignant (P) ou les élèves (E) ou d'une utilisation conjointe par ces deux acteurs (P et E) lors de la mise en œuvre de cette séquence : le document de laboratoire (qui explique le déroulement général de l'ensemble des laboratoires ; voir le document de laboratoire *La cinématique et la dynamique en apprentissage coopératif dans la classe de l'enseignant 2* à l'**annexe 10**) ; le matériel de laboratoire ; le rapport de laboratoire (celui rédigé par les élèves au terme d'un laboratoire) ; les notes de cours ; le cahier d'apprentissage (à la fois office de ressource pour puiser des contenus théoriques et pour s'exercer sur ces contenus) ; les feuilles d'exercices utilisées pour le déploiement des modèles physiques retenus lors de la présentation des laboratoires ; les livres de référence (autres que le manuel scolaire) essentiellement utilisés comme ressources complémentaires au manuel scolaire pour puiser des contenus théoriques en lien avec les thématiques retenues par les élèves ; les ressources multimédias qui consistent en des ressources informatiques textuelles ou visuelles (vidéos explicatives, simulations informatiques) en ligne.

Le **tableau 48** montre que le document de laboratoire (20,9 % du temps), le matériel de laboratoire (25 % du temps), le rapport de laboratoire (54,6 % du temps) et le cahier d'apprentissage (24,8 % du temps) sont de loin les ressources didactiques les plus fréquemment utilisées lors de la mise en œuvre de cette séquence. Les autres ressources didactiques sont utilisées dans moins de 8 % du temps de la séquence et font l'objet d'une utilisation exclusive par les élèves (E) ou d'une utilisation conjointe par ces deux acteurs (P et E).

Quant au **tableau 49**, il spécifie les modalités d'utilisation des ressources didactiques selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires. Nous constatons que le document de laboratoire est utilisé essentiellement par les élèves dans les moments de réalisation des laboratoires (16,5 % du temps) et qu'il fait l'objet d'une plus faible utilisation conjointe enseignant-élèves lors des explications générales (3,2 % du temps) ou des explications spécifiques (1,2 % du temps) des laboratoires. Le matériel de laboratoire est aussi plus utilisé par les élèves dans les moments de

réalisation des laboratoires (17,2 % du temps) comparativement à une utilisation exclusive par l'enseignant de seulement 2,5 % du temps dans ces mêmes moments. Quant au rapport de laboratoire, il est largement utilisé par les élèves, et uniquement par ces acteurs, soit dans les moments de réalisation des laboratoires (26,7 % du temps) ou dans les moments de présentation des laboratoires (23,4 % du temps). Enfin, le cahier d'apprentissage aussi utilisé exclusivement par les élèves fait l'objet d'une utilisation dans les moments de réalisation des laboratoires (7,8 % du temps), et surtout dans les moments d'exercisation (11,1 % du temps).

Tableau 48 : Ressources didactiques utilisées dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus)

Ressources didactiques	Temps	Fréquence relative (%)
<b>Aucune</b>	1 h 2 min 24 s	6,1
<b>Document de laboratoire</b>	<b>3 h 29 min 7 s*</b>	<b>20,9*</b>
Document de laboratoire (E)	2 h 44 min 47 s	16,5*
Document de laboratoire (P et E)	44 min 10 s	4,4
<b>Matériel de laboratoire</b>	<b>4 h 10 min 11 s*</b>	<b>25*</b>
Matériel de laboratoire (E)	3 h 34 min 41 s	21,4
Matériel de laboratoire (P)	35 min 20 s	3,2
<b>Rapport de laboratoire</b>	<b>9 h 6 min 56 s*</b>	<b>54,6*</b>
Rapport de laboratoire (E)	9 h 6 min 56 s	54,6
<b>Notes de cours</b>	<b>1 h 13 min 11 s</b>	<b>7,3</b>
Notes de cours (E)	16 min 45 s	1,6
Notes de cours (P et E)	56 min 26 s	5,6
<b>Cahier d'apprentissage</b>	<b>4 h 08 min 25 s*</b>	<b>24,8*</b>
Cahier d'apprentissage (E)	4 h 08 min 25 s	24,8
<b>Feuille d'exercices</b>	<b>21 min 4 s</b>	<b>2,1</b>
Feuille d'exercices (E)	9 min 7 s	0,9
Feuille d'exercices (P et E)	11 min 57 s	1,2
<b>Livres de référence (autres que le manuel scolaire)</b>	<b>6 min 8 s</b>	<b>0,6</b>
Livre de référence (E)	6 min 8 s	0,6
<b>Ressources multimédias</b>	<b>14 min 34 s</b>	<b>1,4</b>
Ressources multimédias (E)	14 min 34 s	1,4

Tableau 49 : Ressources didactiques utilisées selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence de l'enseignant 2

Contextes	Ressources didactiques utilisées	Temps	Fréquence relative (%)
1. Laboratoire : explications générales	Aucune	52 min 34 s	5,2*
	Document de laboratoire (P et E)	31 min 45 s	3,2
	Matériel de laboratoire (P)	1 min 56 s	0,2
2. Laboratoires : explications spécifiques	Document de laboratoire (P et E)	12 min 35 s	1,2
	Matériel de laboratoire (P)	12 min 35 s	1,2
	Matériel de laboratoire (E)	9 min 16 s	0,9
	Rapport de laboratoire (E)	36 min 32 s	3,6*
	Cahier d'apprentissage (E)	16 min 45 s	1,6
	Notes de cours (E)	16 min 45 s	1,6
3. Laboratoires : réalisation	Document de laboratoire (E)	2 h 44 min 47 s	16,5*
	Matériel de laboratoire (P)	24 min 56 s	2,5
	Matériel de laboratoire (E)	2 h 52 min 14 s	17,2*
	Rapport de laboratoire (E)	4 h 27 min 57 s	26,7*
	Cahier d'apprentissage (E)	1 h 18 min 6 s	7,8
	Livre de référence (E)	6 min 8 s	0,6
	Ressources multimédias (E)	14 min 34 s	1,4
4. Laboratoires : présentation	Aucune	3 min 11 s	0,3
	Matériel de laboratoire (E)	33 min 11 s	3,3
	Rapport de laboratoire (E)	3 h 53 min 48 s*	23,4*
	Cahier d'apprentissage (E)	37 min 23 s	3,7
	Feuille d'exercices (E)	6 min 23 s	0,6
5. Exercisation (incluant correction)	Rapport de laboratoire (E)	8 min 39 s	0,9
	Cahier d'apprentissage (E)	1 h 52 min 17 s*	11,1
	Feuille d'exercices (E)	2 min 44 s	0,2
	Feuille d'exercices (P et E)	11 min 57 s	1,3
6. Théorie	Aucune	6 min 39 s	0,6
	Cahier d'apprentissage (E)	6 min 55 s	0,6
	Notes de cours (P et E)	56 min 26 s*	5,6

### 7.2.5 Les modalités d'organisation de la classe

Le **tableau 50** présente les modalités d'organisation de la classe de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2. Il permet de relever que cette séquence se déroule dans une très grande proportion du temps soit en groupe (GG) (56,1 % du temps), soit en équipes (43,7 % du temps), et qu'une très faible proportion du temps est accordé au travail individuel (0,2 % du temps). Quant au **tableau 51** présentant les modalités d'organisation de la classe de la

séquence d'enseignement de l'enseignant 2 selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, il met en évidence, d'une part, que la modalité d'organisation du travail en grand groupe (GG) est retenue dans tous les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, sauf pour le contexte 3-laboratoires réalisation, et d'autre part, que cette modalité prédomine plus particulièrement dans le contexte 4-Laboratoires : présentation (24,1 % du temps) et le contexte 5-exercisation (12,4 % du temps). Quant à la modalité d'organisation du travail en équipe (EQ) et à la modalité d'organisation du travail individuel, elles sont exclusivement et respectivement retenues dans le contexte 3-Laboratoires : réalisation (43,7 % du temps) et le contexte 5-Laboratoires : exercisation (réalisation et correction) (0,2 % du temps).

Tableau 50 : Modalités d'organisation de la classe dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus)

MOC	Temps	Fréquence relative (%)
En grand groupe	9 h 19 min 23 s	56,1*
En équipes	7 h 15 min 4 s	43,7*
Individuellement	2 min 40 s	0,2
Total	16 h 37 min 7 s	100

Tableau 51 : Modalités d'organisation de la classe selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (tous thèmes confondus)

Contextes de traitement des thèmes disciplinaires	En grand groupe Temps et fréquence relative (%)	En équipes Temps et fréquence relative (%)	Individuellement Temps et fréquence relative (%)
1. Laboratoires : explications générales	49 min 7 s	0	0
	4,9	0	0
2. Laboratoires : explications spécifiques	1 h 24 min 20 s	0	0
	8,4	0	0
3. Laboratoires : réalisation	0	7 h 15 min 4 s	0
	0	43,6*	0
4. Laboratoires : présentation	4 h 3 min 22 s	0	0
	24,1*	0	0
5. Exercices (réalisation et correction)	2 h 4 min 14 s	0	2 min 40 s
	12,4*	0	0,3
6. Théorie	1 h 3 min 5 s	0	0
	6,1	0	0
Total (temps)	9 h 19 min 23 s	7 h 15 min 4 s	2 min 40 s
Total (fréquence relative)	56,1	43,7	0,2

### 7.2.6 Les synopsis des séances de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans cette sous-section, nous donnons un aperçu, sous la forme de synopsis détaillés, du déroulement de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 du point de vue des cinq indicateurs d'ordre mésoscopique précédemment énumérés. Ces descriptions ont pour objectif de contextualiser et donner sens aux résultats à l'échelle microscopique (en matière de tâches épistémiques et de facettes de savoir) décrits dans les prochaines sections. Contrairement à la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, la présente séquence est structurée autour d'un nombre très élevé d'épisodes (227 épisodes) en raison de la modalité d'enregistrement vidéo que nous avons retenue pour capter la pratique d'enseignement de cet enseignant. À cet égard, nous optons pour une description du déroulement de cette séquence en mettant en évidence les éléments marquants de celle-ci, sans toutefois entrer dans les détails, par épisode, comme nous l'avons fait avec l'enseignante 1. De manière à réduire au maximum l'espace de description, nous présentons les synopsis détaillés de chacune des quatorze séances à l'[annexe 18](#).

La **séance 1** ([annexe 18, tableau 1](#)) découpée en 21 épisodes (épisodes 1 à 21) est réalisée dans une première partie pour la phase *Problématiser* en grand groupe (épisodes 1 à 13) et dans une seconde pour la phase *Planifier* (épisodes 14 à 21) en équipes. Elle est amorcée avec l'épisode 1 de gestion du travail d'environ 5 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les différents laboratoires à réaliser. Dans cette première partie de la phase de problématisation, il présente le but du projet qui consiste en l'exploration de plusieurs types de mouvement et décrit brièvement le nouvel environnement matériel de la classe en lien avec les laboratoires à effectuer, plus particulièrement les ressources informatiques à disposition pour le recueil des données. Il explique aux élèves que les grandes thématiques de travail portent à la fois sur les domaines de la cinématique et de la dynamique et expose l'échéancier de travail sur une période de 6 semaines. Il énonce les contenus disciplinaires de base déjà vus dans les séances préalables et qui feront l'objet d'une mobilisation lors de ce projet, soit les forces, les systèmes de forces, la loi de Hooke, le mouvement, les types de trajectoires, les vecteurs et les méthodes d'addition algébrique et graphique. Enfin, il organise de manière aléatoire les 8 équipes qui travailleront sur les différents laboratoires proposés pendant les 7 premières périodes de 75 minutes du projet : les élèves inscrivent leur nom au tableau dans l'une ou l'autre des colonnes où sont

assignés les 8 laboratoires qui se réalisent tous en équipes de 2 élèves, sauf pour les laboratoires D-Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale et G-Mouvement balistique qui se réalisent en équipes de 3 élèves. Dans l'épisode 2 de gestion du travail d'environ 26 minutes, l'enseignant distribue le document de laboratoire *La cinématique et la dynamique en apprentissage coopératif* ([annexe 10](#)). Il décrit brièvement chacun des laboratoires choisis par les élèves, puis il décrit l'approche coopérative retenue pour réaliser ces laboratoires, en soulignant le rôle d'expert qu'ils devront développer et assumer dans le cadre de ce projet, et ce, en vue de contribuer à un partage collectif des savoirs construits au terme du projet. Dès lors, deux intentions pédagogiques sont énoncées aux élèves. Il s'agit, d'une part, de développer le « concept de la méthode scientifique » et de répondre aux exigences associées à la mise en œuvre de cette méthode (suivre des protocoles qui ne fonctionnent pas toujours et les adapter ; effectuer de nombreuses manipulations, faire des allers et retours entre le recueil et l'analyse des données, chercher des solutions optimales, etc.), et d'autre part, de développer les fondements théoriques en lien avec les mouvements des différents types de laboratoires.

P : Dans ce projet, le **but ultime est de développer votre concept de la méthode scientifique**. Lorsqu'on fait de la recherche en sciences (...) il y a des protocoles qu'on suit (...) vous faites des labs puis souvent ça ne marche pas puis il faut recommencer puis comment on le referait bien là vous allez vraiment vous plonger dedans **vous allez faire des choses ça ne marchera peut-être pas** nécessairement toujours comme vous le voulez, mais là vous allez avoir la possibilité de le reprendre de le refaire de le recommencer pour essayer d'aller chercher le résultat le plus optimal possible (...) Vous **allez faire beaucoup beaucoup beaucoup de manipulations** et c'est normal probablement vous allez passer un deux à trois périodes en manipulations. En bout de ligne je veux qu'on travaille beaucoup en lab mais **je veux qu'on travaille aussi beaucoup les fondements qui sont derrière chacun de ces mouvements. Il y a des fondements très très très précis derrière chacun de ces mouvements-là et c'est ça également que je veux que vous développiez. Vous avez donc une partie expérimentale et une partie un peu plus théorique sur chacun de ces mouvements-là** (Séance 1, ens 2)

Ces deux intentions pédagogiques sont d'ailleurs clairement rapportées dans les entrevues préenregistrement 1 et 3 (voir à ce sujet dans la section 7 des résultats associés à la dimension fonctionnelle chez l'enseignant 2) : la mobilisation ou la construction de savoirs procéduraux incluant la méthode scientifique ; la compréhension et la conceptualisation des phénomènes de la physique). Une fois ces deux intentions pédagogiques énoncées, il explique chacune des cinq sections du document de laboratoire *La cinématique et la dynamique en apprentissage coopératif* ([annexe 10](#)) : 1) le plan de travail en 6 étapes ; 2) les consignes pour les exposés ; 3) les modalités d'évaluation pour l'exposé et le rapport de laboratoire ; 4) la spécificité de chacun de laboratoires



en mettant en évidence les buts imposés de l'expérience ; 5) les buts additionnels, les instruments de mesure utilisés.

Soulignons que les 6 premiers laboratoires (A, B, C, D, E et F) ont en commun 4 buts imposés identiques : 1) Déterminer la relation entre la distance parcourue par un mobile suivant le mouvement étudié selon le temps ; 2) Déterminer la relation entre la vitesse d'un mobile suivant le mouvement étudié selon le temps ; 3) Déterminer la relation entre l'accélération d'un mobile suivant le mouvement étudié selon le temps et calculer l'accélération moyenne du mobile ; 4) Analyser le comportement des objets lorsque le mobile suit le mouvement étudié. À ces buts s'ajoutent également 3 buts additionnels identiques : 5) Choisir un facteur qui pourrait influencer le comportement d'un objet en ascension d'un plan incliné ; 6) Bâtir une expérience pour vérifier l'impact exact de votre facteur ; et 7) Expliquer les résultats de votre expérience.

L'épisode 2 est suivi des épisodes 3 à 10 dans lesquels l'enseignant donne pendant une quinzaine de minutes des explications spécifiques sur le fonctionnement des instruments de mesure pour le recueil des données associé à chacun des 8 laboratoires (**figure 92**).

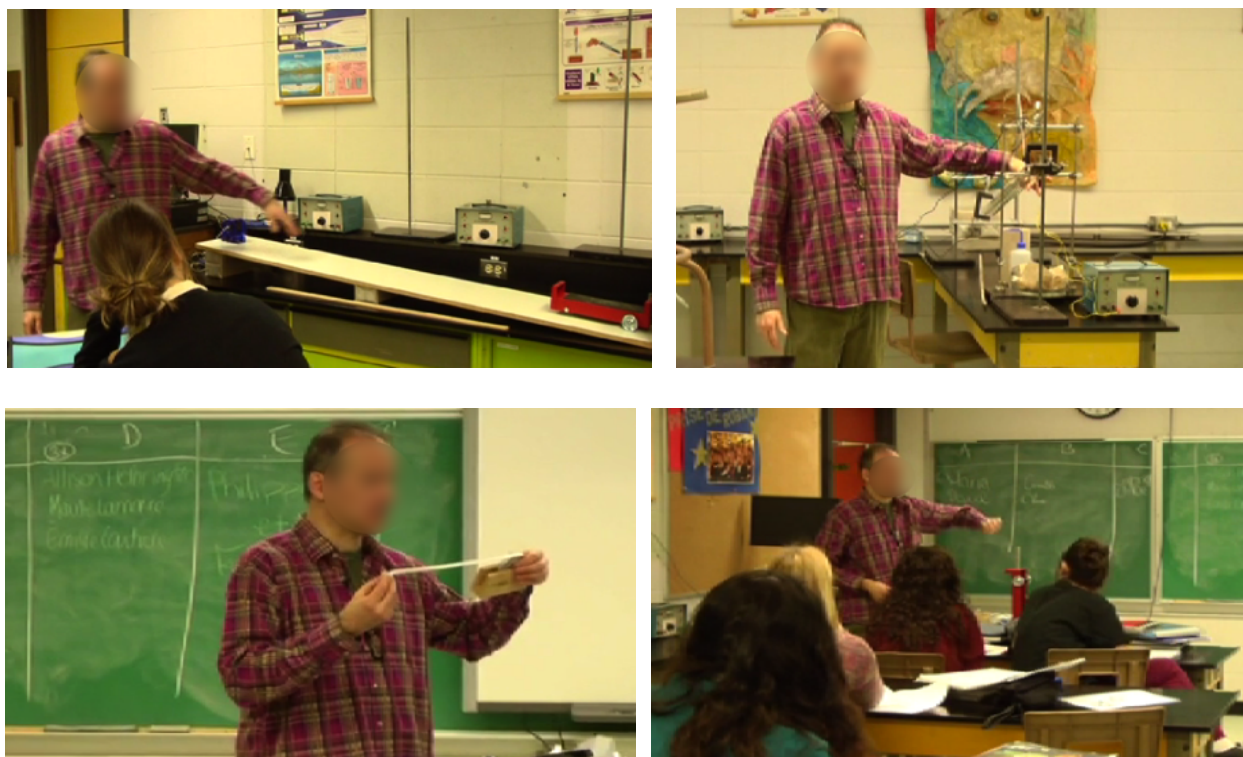


Figure 92- Explications spécifiques sur le fonctionnement d'instruments de mesure dans les 8 laboratoires sur la cinématique et la dynamique (séance 1, ens. 2)

À la suite de nouvelles explications générales sur le fonctionnement des laboratoires (épisodes 11 à 13) qui clôturent la phase de problématisation de cette démarche de modélisation, les élèves sont engagés pendant environ 25 minutes dans une phase de planification (épisodes 14 à 21) où il s'agit de s'approprier le fonctionnement du matériel de laboratoire à leur disposition et de concevoir un protocole approprié à leur laboratoire, notamment en développant des buts additionnels.

La **séance 2** ([annexe 18, tableau 2](#)) : 29 épisodes (épisodes 22 à 50) et réalisée exclusivement en équipe. Dans cette séance, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Planifier* de la démarche de modélisation qui a été amorcée à la séance précédente.

La **séance 3** ([annexe 18, tableau 3](#)) : 43 épisodes (épisodes 51 à 93) et réalisée exclusivement en équipe. Dans cette séance, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation. La séance est amorcée avec l'épisode 51 de gestion du travail d'environ 5 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce ses intentions pédagogiques pour cette séance, soit la poursuite des manipulations expérimentales amorcées à la séance précédente, le recueil des données, le calcul de grandeurs physiques, la construction de graphiques (notamment celui de distance-temps), l'élaboration des modèles mathématiques et l'identification des types de fonctions associées aux modèles mathématiques en jeu.

P : Alors aujourd'hui **on se concentre sur nos manipulations**. On essaie d'avancer dans nos résultats. Il y a probablement des **premiers calculs** aujourd'hui qui vont commencer à se faire peut-être des **premiers graphiques** qui vont commencer au niveau mathématique donc vos **modèles mathématiques** vont commencer à s'intégrer aujourd'hui alors graphiques de distance-temps pour plusieurs équipes (...) Nous sommes également prêts à commencer à bâtir des graphiques et des situations (...) Donc **on recommence à rentrer nos modèles mathématiques**, les **types de fonctions mathématiques** que vous allez obtenir on commence à revenir dans tous ça **opération graphique**. (Séance 3, ens 2)

Enfin, il spécifie par ailleurs que les élèves devront débiter leurs recherches dans les ressources théoriques (Internet, volumes, manuel scolaire) et qu'il fera à nouveau une tournée de l'ensemble des équipes de travail afin de valider leurs démarches et les réorienter au besoin.

La **séance 4** (**annexe 18, tableau 4**) : 37 épisodes (épisodes 94 à 130) et réalisée exclusivement en équipe. Comme c'est le cas lors de la séance précédente, dans cette séance, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation. La séance est amorcée à l'épisode 95 de gestion du travail d'environ 2 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce ses intentions pédagogiques : poursuivre les manipulations expérimentales, le recueil des données (au besoin) et la construction des graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps. Enfin, il spécifie qu'il fera à nouveau une tournée de l'ensemble des équipes de travail afin de valider leurs démarches et les réorienter au besoin.

La **séance 5** (**annexe 18, tableau 5**) 28 épisodes (épisodes 130 à 157) et réalisée exclusivement en équipe. Comme c'est le cas lors de la séance précédente, dans celle-ci, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation. La séance est amorcée avec l'épisode 131 de gestion du travail d'environ 2 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce ses intentions pédagogiques pour cette séance, soient la finalisation des manipulations expérimentales, l'adaptation et l'évaluation du protocole, l'appropriation du mouvement relatif au phénomène étudié, la comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques (attendus), la validation des résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.

P : Ça veut dire que normalement aujourd'hui que certaines équipes vont peut-être juger bon de **retourner faire quelques essais en fonction des résultats obtenus** la semaine passée. Alors on a cette possibilité **d'aller refaire notre protocole en fonction de certains paramètres qu'on désire ajouter ou modifier** (...) Vous êtes dans vos traitements de données. Vous connaissez vos bases théoriques. Vous **connaissez votre mouvement**. Vous êtes en train de tranquillement pas vite de **comparer ces fameux résultats expérimentaux avec ce que la théorie vous donne**. Alors c'est ça l'objectif principal c'est d'être capable de voir si effectivement au niveau protocole on est correct et nos résultats se tiennent (Séance 5, ens 2)

Enfin, il spécifie qu'il fera à nouveau une tournée de l'ensemble des équipes de travail afin de valider leurs démarches et les réorienter au besoin.

La **séance 6** (**annexe 18, tableau 6**) : 20 épisodes (épisodes 158 à 177) et réalisée exclusivement en équipe. Comme c'est le cas lors de la séance précédente, dans cette celle-ci, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation. La séance est amorcée avec l'épisode 158 de gestion du travail d'environ 10 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce l'échéancier, décrit l'ordre de présentation des exposés, explique le contenu et les modalités d'évaluation de présentation.

La **séance 7** (**annexe 18, tableau 7**) : 20 épisodes (épisodes 178 à 183) et réalisée exclusivement en équipe. Comme c'est le cas lors de la séance précédente, dans celle-ci, les épisodes sont en alternance et correspondent à l'accompagnement des élèves par l'enseignant dans la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation. La séance est amorcée avec l'épisode 178 de gestion du travail d'environ 2 minutes dans lequel l'enseignant donne des explications générales sur les laboratoires, notamment sur les modalités de présentation des exposés. C'est à la fin de la séance 7 que se clôture la phase *Investiguer* de la démarche de modélisation.

La **séance 8** (**annexe 18, tableau 8**) : 6 épisodes (épisodes 184 à 189) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle porte notamment sur le déroulement du lab C-Mouvement sur une table à coussin d'air, et par conséquent, elle est dédiée au modèle au modèle du mouvement rectiligne uniforme (MRU). C'est à partir de cette séance que la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation est amorcée. Dans l'épisode 184 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 7 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il explique les critères d'évaluation des présentations orales de manière détaillée (contenu, niveau de vulgarisation, aspects évaluatifs, etc.) ainsi que son rôle dans les présentations : poser des questions, compléter l'information, modérer les discussions, etc. Cet épisode est suivi des épisodes 185, 186, et 188 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 25 minutes les éléments de leur laboratoire : graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un MRU, les forces qui agissent sur la table à coussin d'air dans la phase de propulsion et dans la phase après propulsion et la variation de la masse du disque dans le MRU. Ces épisodes sont entrecoupés de l'épisode 187 d'exercisation dans lequel les élèves effectuent et corrigent pendant 8 minutes un problème d'application sur le MRU avec les autres élèves de la

classe. La séance se clôture avec l'épisode 189 de théorisation dans lequel l'enseignant explique la méthode de l'aire sous la droite pour effectuer un passage du graphique vitesse-temps à un graphique distance-temps.

La **séance 9** (**annexe 18, tableau 9**) : 7 épisodes (épisodes 190 à 196) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab A-Mouvement en chute libre sans propulsion initiale, et par conséquent elle est dédiée au modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Dans l'épisode 190 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 5 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il explique les modalités d'évaluation des présentations et rappelle son rôle de médiateur dans les présentations. Cet épisode est suivi des épisodes 185, 186 et 188 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 25 minutes les éléments de leur laboratoire : graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un MRU ; forces qui agissent sur la table à coussin d'air dans la phase de propulsion et dans la phase après propulsion et la variation de la masse du disque dans le MRU. Ces épisodes sont entrecoupés de l'épisode 187 d'exercisation dans lequel les élèves effectuent et corrigent pendant 8 minutes un problème d'application sur le MRU avec les autres élèves de la classe. La séance se clôture avec l'épisode 189 de théorisation dans lequel l'enseignant explique la méthode de l'aire sous la droite pour effectuer un passage du graphique vitesse-temps à un graphique distance-temps.

La **séance 10** (**annexe 18, tableau 10**) : 5 épisodes (épisodes 197 à 201) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab B-Mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale (MVA), et par conséquent elle est dédiée au modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Dans l'épisode 197 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 2 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce la thématique abordée et fait des liens avec les laboratoires précédents en regard des modèles physiques en jeu. Cet épisode est suivi des épisodes 198, 199 et 200 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 30 minutes les éléments de leur laboratoire : définition du MVA et recueil de données ; graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MVA ; la force de propulsion. Par la suite, dans l'épisode 201 d'exercisation, les élèves effectuent et corrigent en collectif pendant une trentaine de minutes

quelques problèmes d'application sur le MVA. Contrairement à la séance précédente, l'enseignant n'introduit pas d'éléments théoriques à la fin de cette séance.

La **séance 11** ([annexe 18, tableau 11](#)) : 8 épisodes (épisodes 202 à 209) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab D- Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale (PID), et par conséquent elle est dédiée au modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Dans l'épisode 202 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 2 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce la thématique abordée et fait des liens avec les objets en mouvement sur des plans inclinés descendants et ascendants. Cet épisode est suivi des épisodes 203 à 207 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 26 minutes les éléments de leur laboratoire : constantes, variables, facteurs et hypothèses du laboratoire ; distance, vitesse et accélération d'un mobile sur un PID ; symboles, formules et unités de mesure utilisés dans l'étude de mobiles sur un PID ; schéma de forces d'un mobile sur un PID. Par la suite, dans l'épisode 208 d'exercisation, les élèves effectuent et corrigent en collectif pendant une vingtaine de minutes quelques problèmes d'application sur les mouvements d'objets matériels sur les plans inclinés descendants. La séance se clôture avec l'épisode 209 de théorisation dans lequel l'enseignant explique comment adapter les formules mathématiques de distance et de vitesse pour la chute libre, le MVA et les PI.

La **séance 12** ([annexe 18, tableau 12](#)) : 8 épisodes (épisodes 210 à 217) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab E-Mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale (PIA), et par conséquent elle est dédiée au modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Dans l'épisode 210 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 3 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce la thématique abordée et fait des liens avec les objets en mouvement sur des plans inclinés descendants et ascendants. Cet épisode est suivi des épisodes 211, 212, 214 et 215 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ quarantaine de minutes les éléments de leur laboratoire : installation d'un dispositif de recueil de données ; schéma de forces d'un mobile sur un PIA ; comparaison des mouvements d'objets matériels sur les PIA et les PID ; loi de Hooke ; influence des facteurs dans le mouvement sur un PIA (masse, angle d'inclinaison,



etc.). Par la suite, dans l'épisode 216 de théorisation, l'enseignant explique comment adapter les formules mathématiques de position, de vitesse et du mouvement dans divers contextes (PIA, PID, chute libre, etc.). Quant aux épisodes 213 et 217 d'exercisation, les élèves effectuent et corrigent, en collectif, pendant une vingtaine de minutes quelques problèmes d'application sur les mouvements d'objets matériels sur les plans inclinés ascendants.

La **séance 13** ([annexe 18, tableau 13](#)) : 5 épisodes (épisodes 218 à 222) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab F-Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu (air/eau) (PID avec milieux), et par conséquent, elle est dédiée aux modèles du mouvement rectiligne uniforme (MRU) et du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA). Dans l'épisode 218 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 3 minutes des explications générales sur les laboratoires. Plus précisément, il énonce la thématique abordée et fait des liens avec les objets en mouvement sur des plans inclinés descendants, tout en précisant que le milieu sera une variable en ajout au laboratoire précédemment exploré. Cet épisode est suivi des épisodes 219 et 220 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 36 minutes les éléments de leur laboratoire : manipulations et procédures de recueil des données ; distance, vitesse et accélération d'un mobile sur un PID sans propulsion et avec influence du milieu ; graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile sur un PID sans propulsion et avec influence du milieu ; forces en jeu dans le mouvement de la bille dans l'eau. Par la suite, dans l'épisode 221 de théorisation, les élèves expliquent pendant une quinzaine de minutes le concept de la poussée d'Archimède, et dans l'épisode 222 de théorisation, l'enseignant explique pendant une vingtaine de minutes comment construire et analyser des graphiques vitesse-temps et accélération-temps.

Nous terminons enfin avec la **séance 14** ([annexe 18, tableau 14](#)) : 5 épisodes (épisodes 223 à 227) et réalisée exclusivement en grand groupe. Elle fait état du lab G-Mouvement balistique, et par conséquent, elle est dédiée au modèle du mouvement balistique qui combine les MRU et le MRUA. Dans l'épisode 223 de gestion du travail, l'enseignant donne pendant environ 1 minute des explications générales sur les laboratoires en affirmant que ce laboratoire permet d'établir des liens avec plusieurs laboratoires. Cet épisode est suivi des épisodes 224 et 226 de présentation du laboratoire dans lesquels les élèves présentent pendant environ 45 minutes les

éléments de leur laboratoire : théorie des projectiles dans l'antiquité (conception de l'impetus) ; décomposition du mouvement balistique en ses composantes verticale et horizontale ; résultats du laboratoire (variation de la distance selon le temps de vol) ; formules et calculs sur la portée. Par la suite, dans l'épisode 227 les élèves effectuent et corrigent en collectif pendant environ 27 minutes quelques problèmes d'application sur la portée d'un projectile dans un mouvement balistique. Cette séance clôture la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation.

### 7.3 La pratique d'enseignement de l'enseignant 2 à l'échelle microscopique

#### 7.3.1 Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des tâches épistémiques

Nos analyses sous l'angle des tâches épistémiques sur la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 ont permis de dégager 21 tâches épistémiques avec une fréquence d'apparition totale de 3740 tâches pour une durée de 16 h. Les six tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées en regard de leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus) dans cette séquence d'enseignement sont, dans l'ordre décroissant, les tâches ÉVALUER (N=1150), DÉCRIRE (N=724), EXPLIQUER (N=589), IDENTIFIER (N=201), ÉNONCER (N=172) et COMPARER (N=152). Dans une moindre proportion, nous recensons les tâches épistémiques REPRÉSENTER (N=111), INTERPRÉTER (N=108), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (N=96), EXEMPLIFIER (N=75) et ARGUMENTER (N=65) (**figure 93**). Cependant, si nous considérons la durée totale de ces tâches épistémiques, l'ordre diffère. Ce sont de loin les tâches épistémiques EXPLIQUER (DT=288,8 min), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DT=131,1 min), ÉVALUER (DT=128,4 min), DÉCRIRE (DT=124 min) et GÉNÉRER (DT=80 min) qui occupent la part de temps la plus importante dans la séquence d'enseignement. En termes de durée, les tâches épistémiques IDENTIFIER (DT=47,3 min) et COMPARER (DT=22,3 min) occupent une part de temps moins importante que les précédentes (**figure 94**). Cela s'explique par le fait que la durée moyenne des tâches épistémiques varie considérablement selon la nature de la tâche. La **figure 95** montre que si la durée moyenne d'une tâche épistémique est d'environ 17 secondes, les durées moyennes des tâches épistémiques GÉNÉRER (DM=270 s), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DM=82 s), EXPLIQUER (DM=29 s), REPRÉSENTER (DM=24 s),



EXEMPLIFIER (DM=20 s) et INTERPRÉTER (DM=18 s) sont nettement supérieures à celles des tâches épistémiques DÉCRIRE (DM=10 s) et ÉVALUER (DM=7 s).

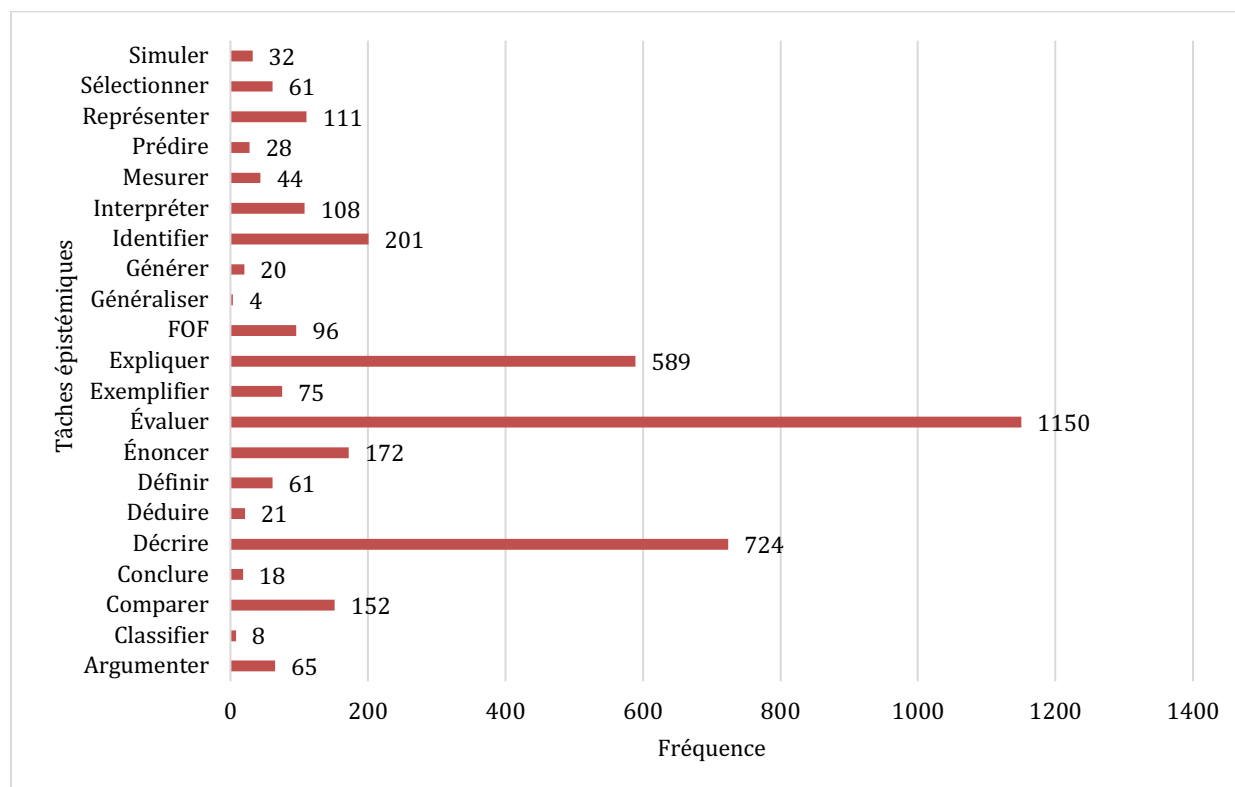


Figure 93- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

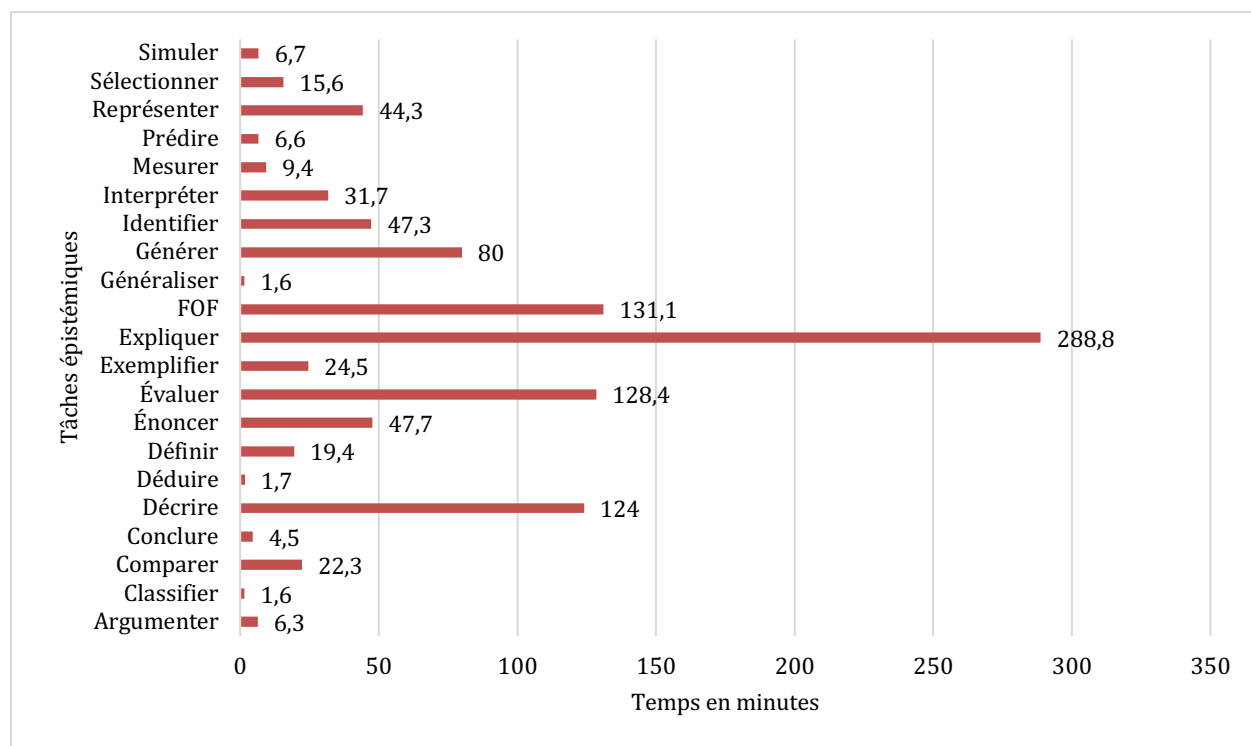


Figure 94- Durée totale (en minutes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

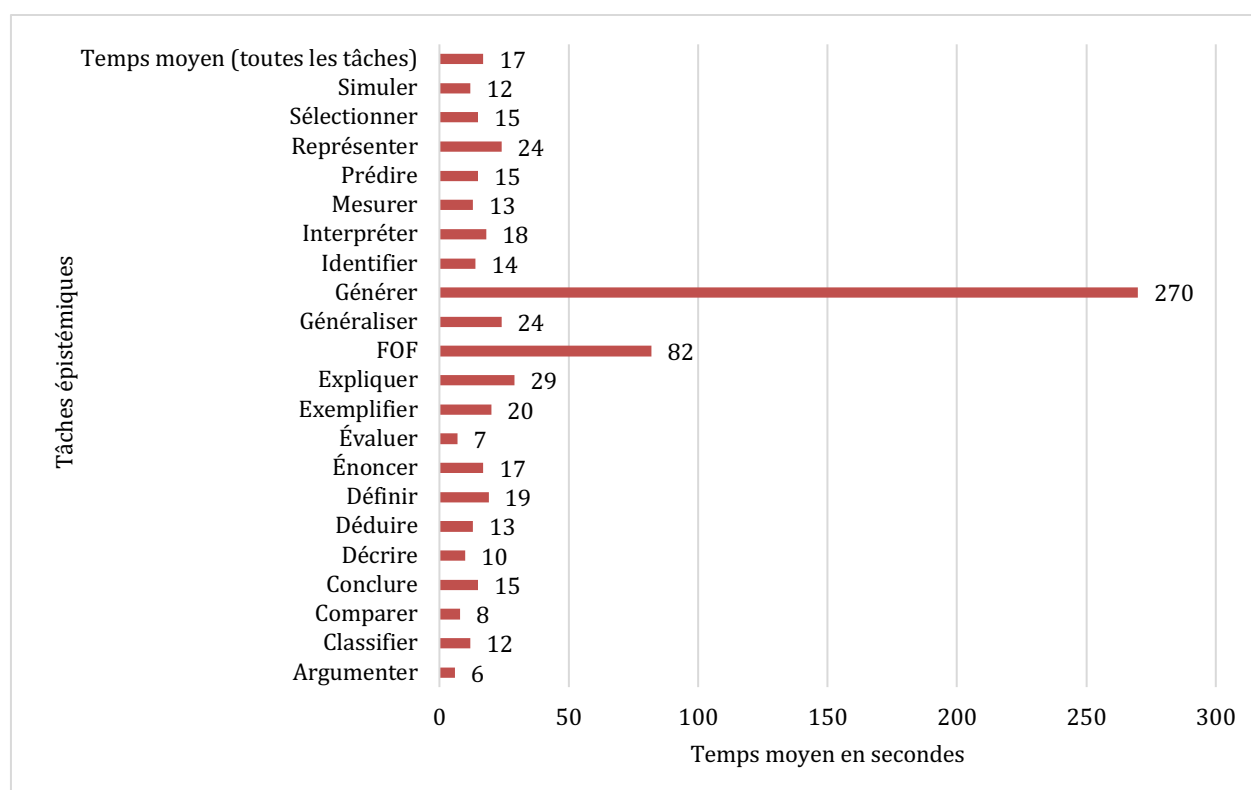


Figure 95- Durée moyenne (en secondes) associée aux tâches épistémiques (tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Sur le plan thématique, si le nombre de tâches épistémiques est plus élevé dans le thème 2 (N=1959) que dans les autres thèmes disciplinaires (**figure 96**), c'est dans le thème 1-MRU (DTh=5,0) que la densité thématique (le nombre de tâches épistémiques par minute) est la plus élevée (**tableau 50**). Les autres thèmes ont une densité thématique comparable variant entre 3,2 et 4,2. Par ailleurs, comme le montre la **figure 97**, les tâches épistémiques sont pour la plupart présentes dans l'ensemble des thèmes disciplinaires.

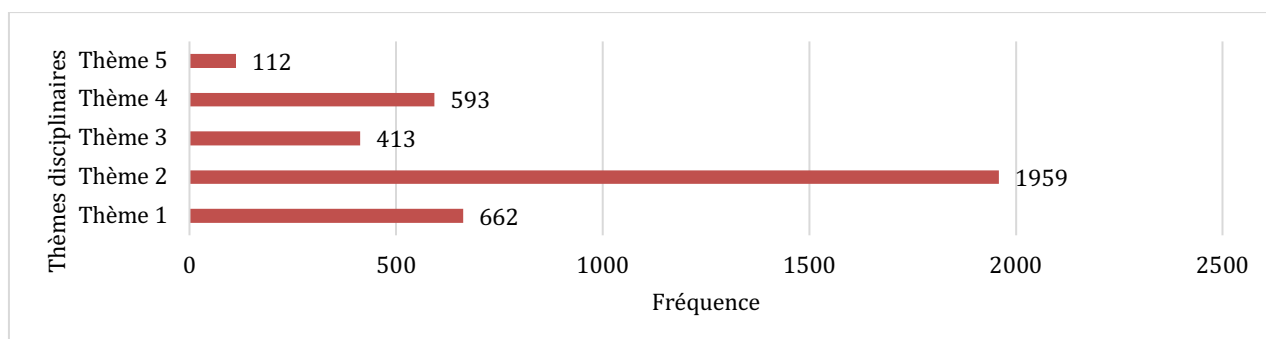


Figure 96- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Tableau 52 : Densité des tâches épistémiques (nombre de tâches épistémiques par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Thème 1 MRU	Thème 2 MRUA	Thème 3 MRU et MRUA	Thème 4 Mouvement balistique	Thème 5 Mouvement pendulaire
5,0	4,0	3,2	4,2	3,9

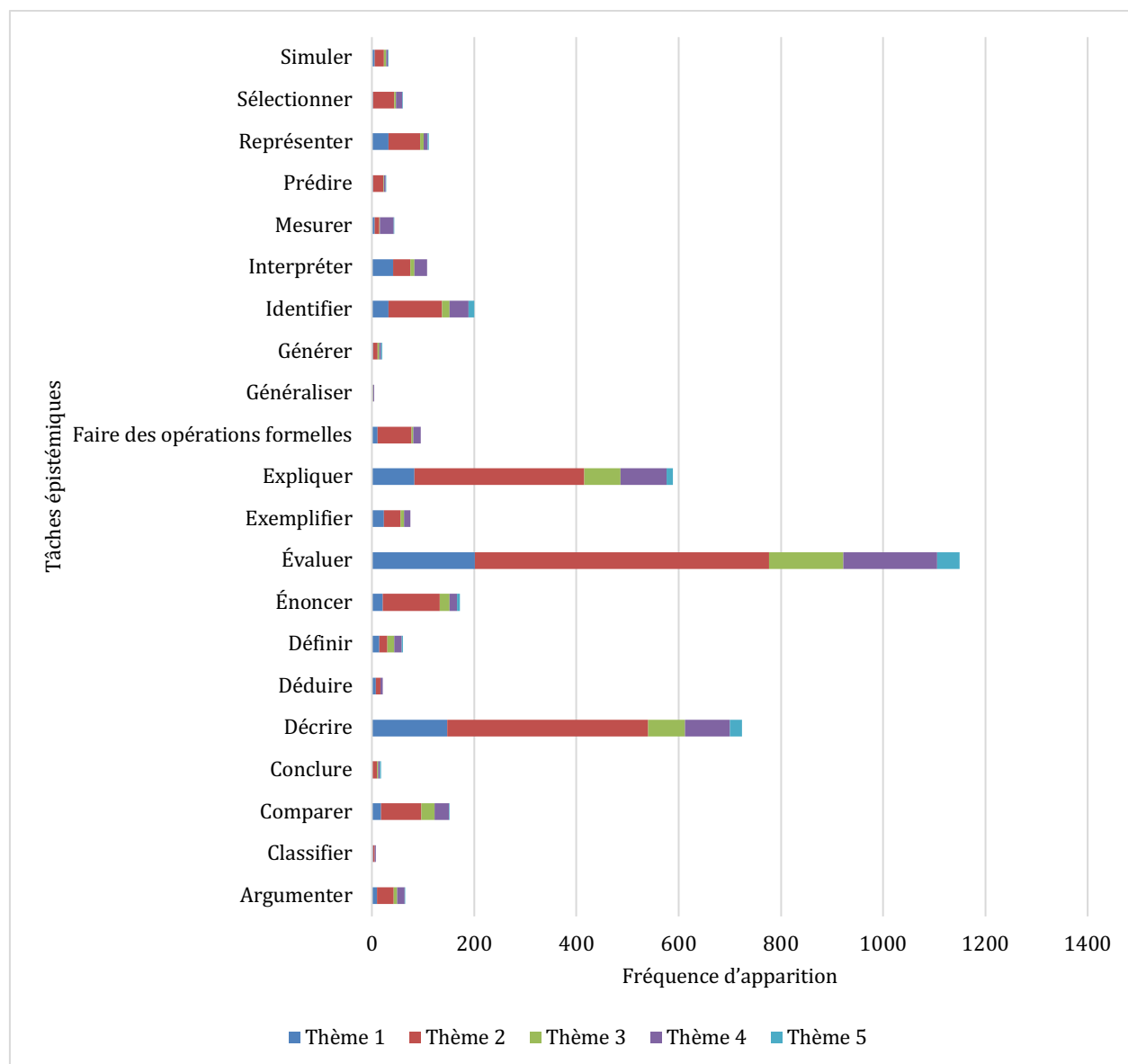


Figure 97- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon les thèmes disciplinaires dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans cette séquence d'enseignement, la prise en charge des tâches épistémiques, suscitées ou réalisées par l'enseignant ou les élèves, s'effectue par les élèves. En effet, 55 % des tâches épistémiques sont prises en charge par les élèves alors que 45 % le sont par l'enseignant (**figure 98**). De manière spécifique, sans distinguer si les tâches épistémiques sont suscitées ou réalisées, les tâches ARGUMENTER (P : 23 ; E : 42), CLASSIFIER (P : 5 ; E : 3), COMPARER (P : 66 ; E : 86), CONCLURE (P : 0 ; E : 18), DÉCRIRE (P : 266 ; E : 458), DÉDUIRE (P : 9 ; E : 12 ), DÉFINIR (P : 17 ; E : 44), ÉNONCER (P : 63 ; E : 109 ), EXEMPLIFIER (P : 0 ; E : 20), EXPLIQUER

(P : 274 ; E : 315), GÉNÉRALISER (P : 1 ; E : 3), GÉNÉRER (P : 0 ; E : 20), IDENTIFIER (P : 91 ; E : 110), INTERPRÉTER (P : 36 ; E : 72) et MESURER (P : 20 ; E : 24) sont davantage du côté des élèves alors que les tâches épistémiques ÉVALUER (P : 599 ; E : 551), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (P : 54 ; E : 42), REPRÉSENTER (P : 68 ; E : 43), SÉLECTIONNER (P : 36 ; E : 25) et SIMULER (P : 19 ; E : 13) le sont davantage du côté de l'enseignant (**figure 99**). Cependant, l'écart sur le plan de la distribution entre les élèves et l'enseignant est relativement faible pour toutes ces tâches, sauf pour la tâche épistémique décrire.

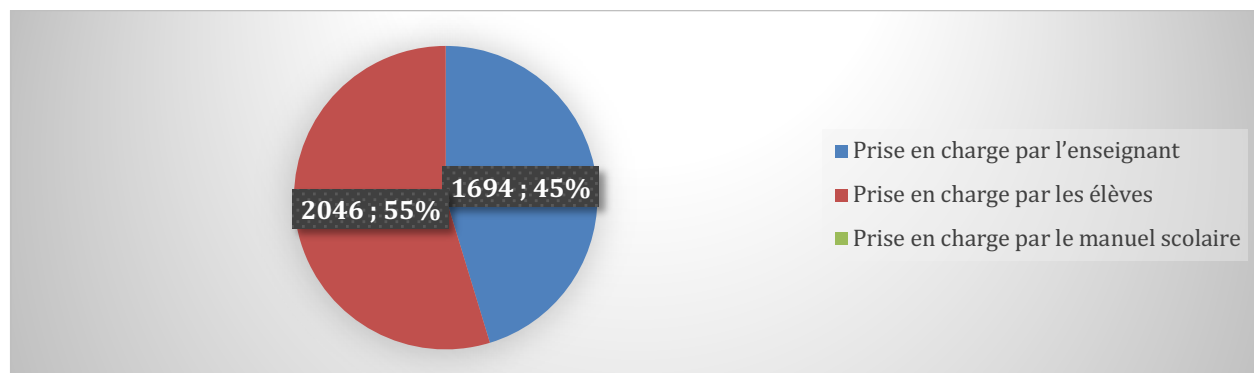


Figure 98- Prise en charge des tâches épistémiques (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

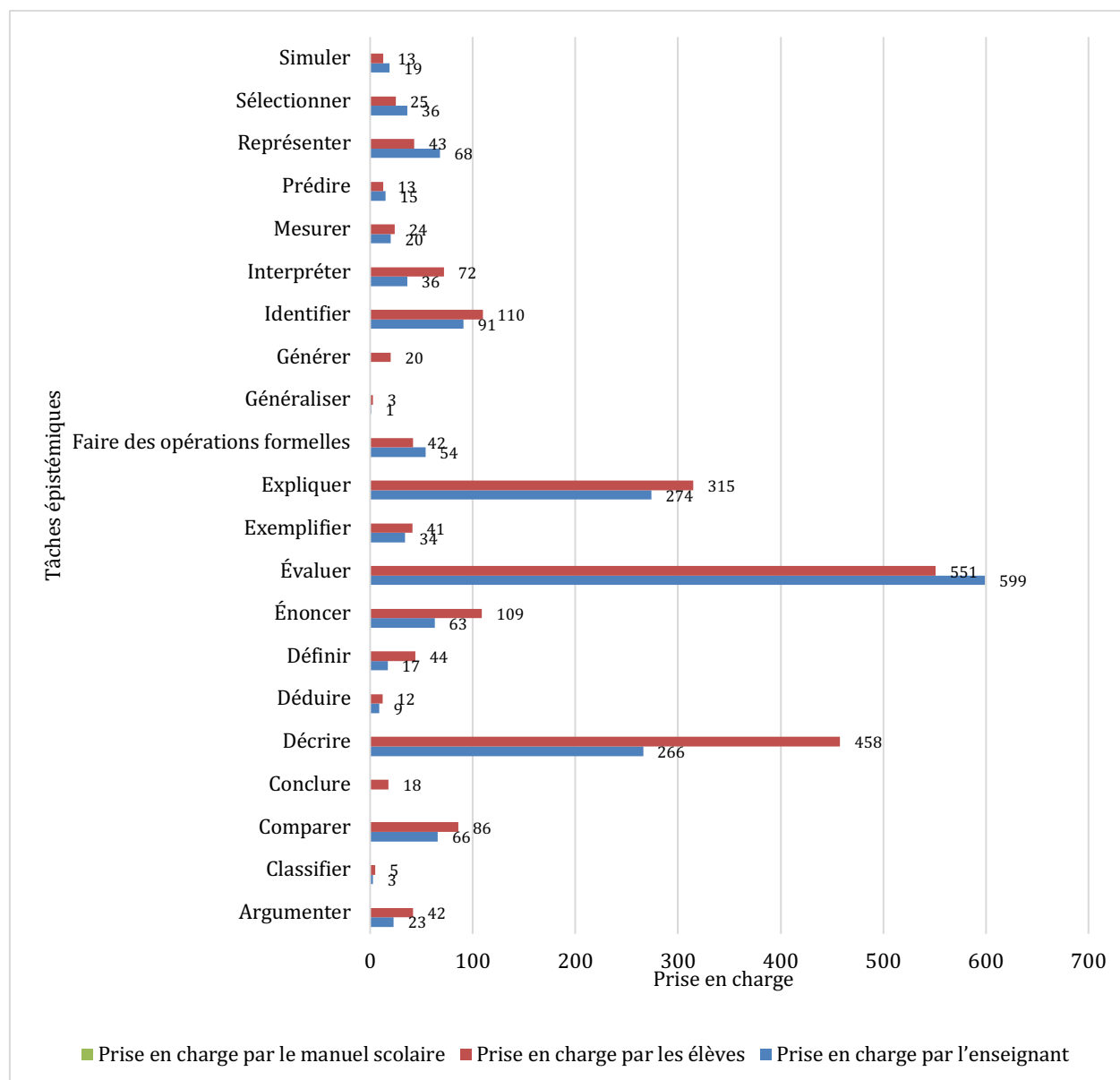


Figure 99- Fréquence d'apparition des tâches épistémiques selon leur prise en charge (suscitées ou réalisées, tous thèmes confondus) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Sur le plan des registres de modélisation, les tâches épistémiques sont essentiellement ancrées dans le MOE (N=1484) ou dans le MTM (N=1462), et ce, dans une proportion similaire. Une moindre proportion de ces tâches met en relation le MOE avec le MTM (N=780) (**figure 100**). Dans cette séquence, si on privilégie tout autant la construction du registre empirique que la construction du registre théorique, la mise en relation entre ces deux registres est également très fréquente.

La **figure 101** met en évidence une mobilisation très variable des registres de modélisation selon la nature de la tâche épistémique. En effet, les tâches épistémiques ARGUMENTER (31 tâches sur 65), DÉCRIRE (381 tâches sur 724), ÉVALUER (545 tâches sur 1150), GÉNÉRER (12 tâches sur 20), MESURER (44 tâches sur 44), SÉLECTIONNER (34 tâches sur 61) et SIMULER (32 tâches sur 32) portent essentiellement sur le MOE ; les tâches épistémiques CLASSIFIER (4 tâches sur 8), CONCLURE (18 tâches sur 18), DÉFINIR (60 tâches sur 61), ÉNONCER (99 tâches sur 172), EXPLIQUER (264 tâches sur 589), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (96 tâches sur 96), GÉNÉRALISER (4 tâches sur 4) et IDENTIFIER (102 tâches sur 201) portent essentiellement sur le MTM ; les tâches épistémiques COMPARER (74 tâches sur 152), DÉDUIRE (9 tâches sur 21), EXEMPLIFIER (36 tâches sur 75), INTERPRÉTER (90 tâches sur 108), PRÉDIRE (12 tâches sur 28) et REPRÉSENTER (109 tâches sur 111) mettent davantage en relation le MOE avec le MTM.

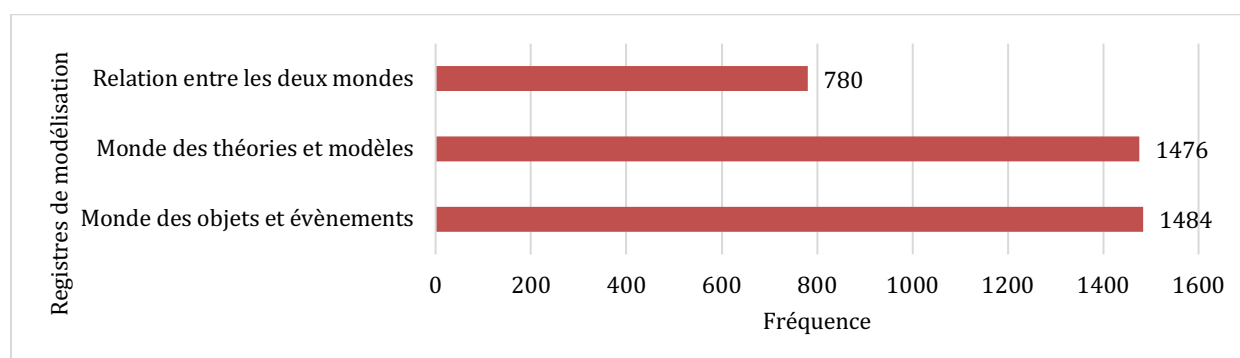


Figure 100- Registres de modélisation (toutes tâches confondues) dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

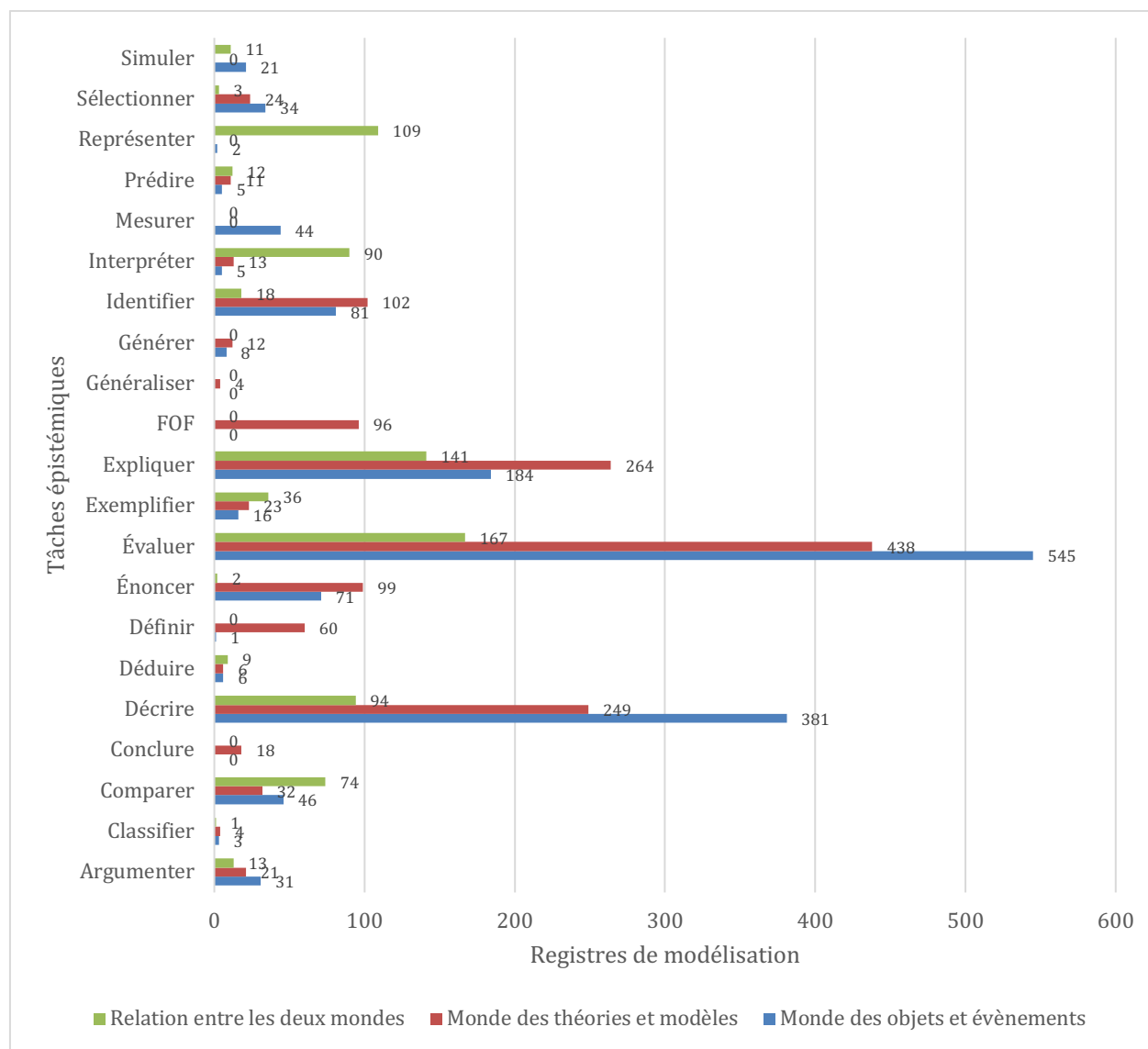


Figure 101- Distribution des tâches épistémiques selon les registres de modélisation dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans ce qui suit, nous présentons les descriptions spécifiques des tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées quant à leur fréquence d'apparition ou à leur durée totale au cours de cette séquence. Ces tâches, représentées selon leur fréquence d'apparition dans l'ordre décroissant, sont accompagnées de trois exemples typiques de mobilisation dans l'un ou l'autre des registres de modélisation. Les autres tâches sont présentées à l'[annexe 23](#).

La tâche épistémique ÉVALUER se démarque des autres tâches en raison de sa fréquence d'apparition élevée de 1150 qui est de loin la plus grande parmi toutes les tâches épistémiques. Sa



durée totale de 2 h 18 min 21 s. fait en sorte qu'elle occupe une part de temps assez importante de la séquence même si sa durée moyenne de 7 s est nettement inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est fortement suscitée par les élèves et fortement réalisée par l'enseignant, et dans une moindre proportion, elle est suscitée par l'enseignant ou réalisée par les élèves. La durée de la prise en charge de cette tâche est plus grande du côté de l'enseignant (DP=1 h 32 min 30 s) que de celui des élèves (DE=45 min 51 s). Cette tâche se déploie essentiellement dans le MOE et le MTM (**figure 102**).

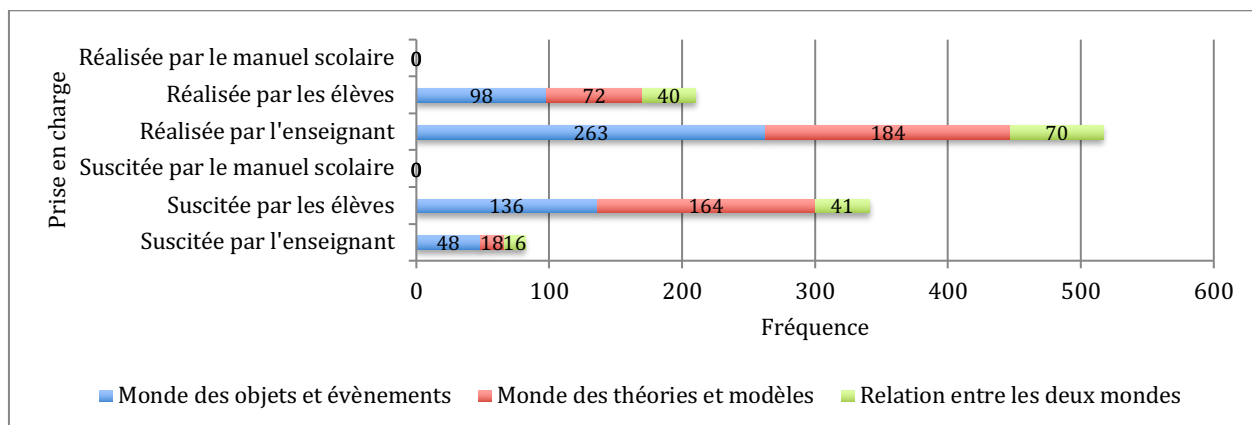


Figure 102- Tâche épistémique ÉVALUER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- le fonctionnement de différents instruments de mesure : le chronomètre à étincelles, l'interface du logiciel de DataStudio, les sondes Pasco reliées à des capteurs photovoltaïques, la table à coussin d'air (S1, S2, S3) ;
- le choix et la diversité des facteurs à expérimenter retenus, par exemple la masse du charriot, l'angle d'inclinaison du plan ou du propulseur, la force de propulsion du propulseur, la température, etc. (S2, S3, S4) ;
- la prise en compte des « variables parasites » pouvant influencer le mouvement, par exemple le frottement du ruban marqueur sur le chronomètre à étincelles ou la résistance de l'air dans le mouvement lors du mouvement d'une bille d'acier en chute libre, le frottement des roues du charriot sur la surface du plan incliné, etc. (S2, S3, S4).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- des procédures pour calculer des grandeurs physiques, par exemple la vitesse initiale d'un projectile sachant la distance et le temps, la constante de rappel du ressort, la force de propulsion du propulseur, la portée d'un projectile, une distance à l'aide de la méthode de l'air sous la courbe d'un graphique vitesse-temps, une accélération instantanée ou moyenne, etc. (S1, S2, S3, S6, S8, S9, S10) ;

- la description des tracés ou des fonctions mathématiques associés aux graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un MRU ou d'un MRUA (S6, S7, S8, S10) ;
- des classifications de phénomènes à leurs types de mouvement respectif, par exemple une chute libre à un MRUA (S7, S8, S9, S13).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à évaluer positivement ou négativement :

- les graphiques vitesse-temps accélération-temps d'un mouvement vertical ascendant pour la phase de propulsion et la phase « après propulsion » (S4, S10) ;
- la grandeur de l'écart entre les valeurs expérimentale et théorique d'accélération dans des objets matériels suivant un MRUA ou un mouvement balistique (S5, S11, S12, S14) ;
- le schéma de forces retenu pour représenter un MRU ou un mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale (S7, S8, S10).

La tâche épistémique DÉCRIRE se démarque des autres tâches par sa fréquence d'apparition très élevée de 724 sur la séquence. Sa durée totale de 2 h 3 min 57 s fait en sorte qu'elle occupe une part de temps assez importante de la séquence même si sa durée moyenne de 10 s est nettement inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est suscitée ou réalisée fortement par les élèves, et dans une moindre proportion, elle est suscitée ou réalisée par l'enseignant. La durée de la prise en charge de cette tâche est légèrement plus grande du côté des élèves (DE=1 h 9 min) que de celui de l'enseignant (DP=54 min 57 s). Cette tâche se déploie essentiellement dans le MOE et le MTM (**figure 103**).

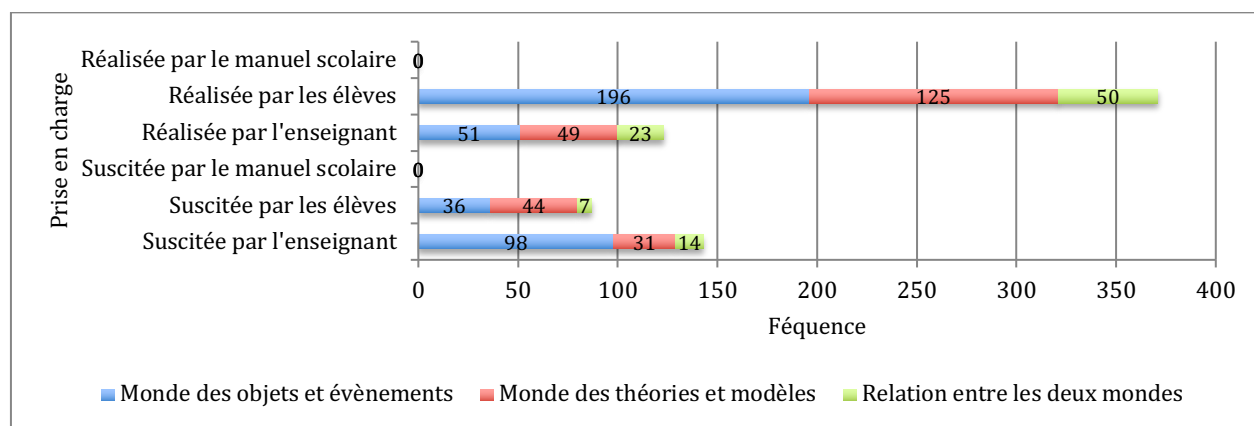


Figure 103- Tâche épistémique DÉCRIRE selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- le contexte et les conditions d'expérimentation d'un laboratoire : matériel de laboratoire nécessaire, facteurs expérimentaux retenus (masse, angle d'inclinaison du plan ou du propulseur, force de

propulsion, grosseur de la bille...), sources d'erreurs expérimentales, etc. (S2, S4, S5, S7, S8, S9, S10, S11, S12, S13) ;

- des problèmes de fonctionnement associés à du matériel de laboratoire (sondes Pasco du logiciel StudioData, chronomètre à étincelles, logiciel Geogebra, table à coussin d'air, etc. (S2, S3) ;
- les effets de facteurs expérimentaux sur le mouvement des objets matériels, par exemple l'influence de la masse sur le mouvement d'une rondelle sur une table à coussin d'air ou d'un charriot sur un plan incliné, du milieu (air/eau) sur la vitesse d'une bille sur un plan incliné descendant avec ou non l'influence du milieu, de la force de propulsion sur la portée d'un projectile (S2, S3, S7, S8, S13).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- le signe de l'accélération théorique dans un mouvement en chute libre, dans un mouvement ascendant avec propulsion initiale et dans un mouvement balistique (S3, S8, S9, S14) ;
- des unités de mesure pour exprimer une distance, une vitesse, une accélération, une force, une masse volumique (S7, S8, S9, S10, S13) ;
- la signification de symboles (accélération, frottement cinétique, masse volumique, etc.) dans des formules (S10, S13).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à décrire :

- les tracés des graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps et les relations mathématiques à ces graphiques (S8, S9, S10, S12, S13) ;
- les signes de la vitesse verticale et de la vitesse horizontale d'une balle en mouvement balistique à différent moment de sa trajectoire (S2, S4, S14) ;
- les types de mouvement (MRU et MRUA) associés à mouvement sur les plans inclinés descendants avec influence des milieux (S13).

La tâche épistémique EXPLIQUER est de loin celle qui occupe la part de temps la plus importante de la séquence d'enseignement comparativement aux autres tâches épistémiques. Elle se démarque des autres tâches en raison de sa fréquence d'apparition importante (589 fois), de sa durée totale de 4 h 48 min 46 s, ainsi que de sa durée moyenne de 29 s. qui sont relativement élevées. Cette tâche est suscitée ou réalisée par les élèves et l'enseignant dans une proportion similaire. La durée de sa prise en charge du côté de l'enseignant (DP=2 h 22 min 24 s) est à peu près la même que du côté des élèves (DE=2 h 26 min 22 s). Cette tâche se déploie dans les trois registres de modélisation, avec une prédominance dans le MOE et le MTM (**figure 104**).

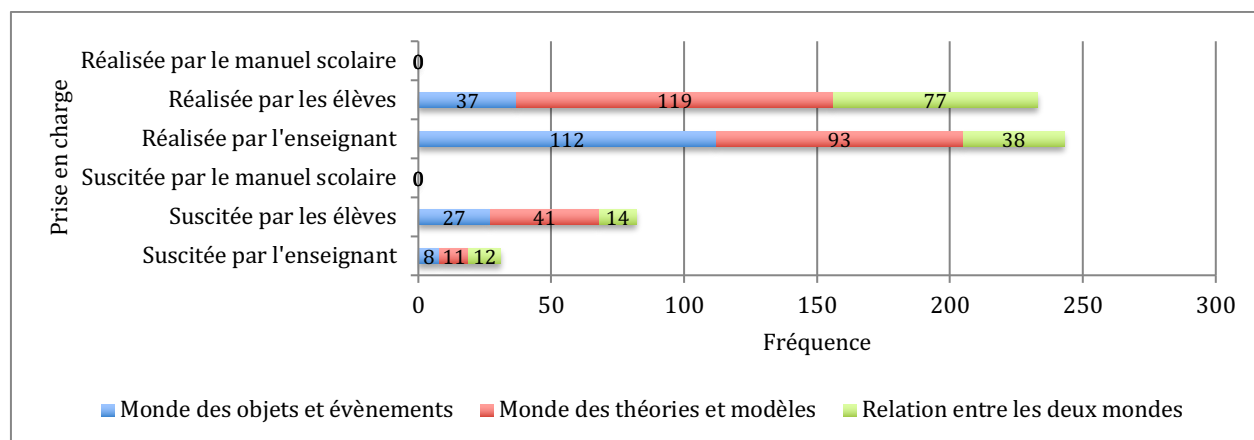


Figure 104- Tâche épistémique EXPLIQUER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- le fonctionnement des instruments de mesure (chronomètre à étincelles, interfaces du logiciel de DataStudio, sondes Pasco reliées aux capteurs photovoltaïques) pour le recueil des données et la production de tables de valeurs (S1, S2, S3, S4, S9) ;
- la nécessité d'effectuer des manipulations avec rigueur : effectuer un montage adéquat, contrôler adéquatement les variables, s'assurer d'avoir des conditions expérimentales optimales, recueillir suffisamment de données pour modéliser le phénomène, etc. (S2, S3, S4, S5, S6, S7) ;
- que l'angle d'inclinaison n'a pas d'influence sur la vitesse initiale de la bille, et que cette vitesse est considérée dans un intervalle de temps très petit au moment du lancement de manière à ce que la gravité affecte peu sa valeur (S14).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- que le mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale se réalise en deux phases : la phase de propulsion lorsque la balle est initialement en contact avec le propulseur et la phase « après propulsion » lorsque la balle est mouvement vertical sans contact avec le propulseur (S10) ;
- des procédures pour calculer des grandeurs physiques, par exemple le temps moyen d'une période d'un pendule, le déplacement, la distance parcourue, la vitesse initiale d'un projectile au moment sa propulsion, la portée d'un projectile, les vitesses et accélérations instantanées, les vitesses et des accélérations moyennes, la force de propulsion du propulseur, l'étirement d'un ressort, la constante de rappel d'un ressort, la force de propulsion du propulseur, la force résultante dans un schéma vectoriel (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S12) ;
- des procédures pour construire des graphiques distance-temps, vitesse-temps ou accélération-temps, notamment en sélectionnant une échelle de mesure appropriée et en excluant les données aberrantes au début et à la fin du mouvement en raison de la non-stabilisation du mouvement (S2, S3, S4, S5, S7).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à expliquer :

- que dans le mouvement sur la table à coussin d'air, la variation de la masse du disque n'entraîne aucun effet sur l'accélération du disque, cette accélération étant nulle, mais qu'elle entraîne des effets significatifs sur la variation de la position et la vitesse (S8) ;

- qu'après la phase de propulsion de la bille dans un mouvement en chute libre, la seule force à laquelle la bille est soumise est la force de gravité, hormis la force de frottement de l'air (S14) ;
- que dans un mouvement balistique, c'est à l'angle de tir de 90 degrés le temps de vol est le plus long, car toute l'énergie est transférée sur la composante verticale du mouvement (S14).

La tâche épistémique IDENTIFIER apparaît 201 fois dans la séquence avec une durée totale de 47 min 16 s et une durée moyenne de 14 s, cette dernière étant légèrement inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est fortement réalisée par les élèves, et dans une moindre proportion, elle est suscitée ou réalisée par l'enseignant. La durée de la prise en charge de cette tâche est plus grande du côté de l'enseignant (DP=29 min 53 s) que de celui des élèves (DE=17 min 33 s). Elle se déploie essentiellement dans le MOE ou le MTM (**figure 105**).

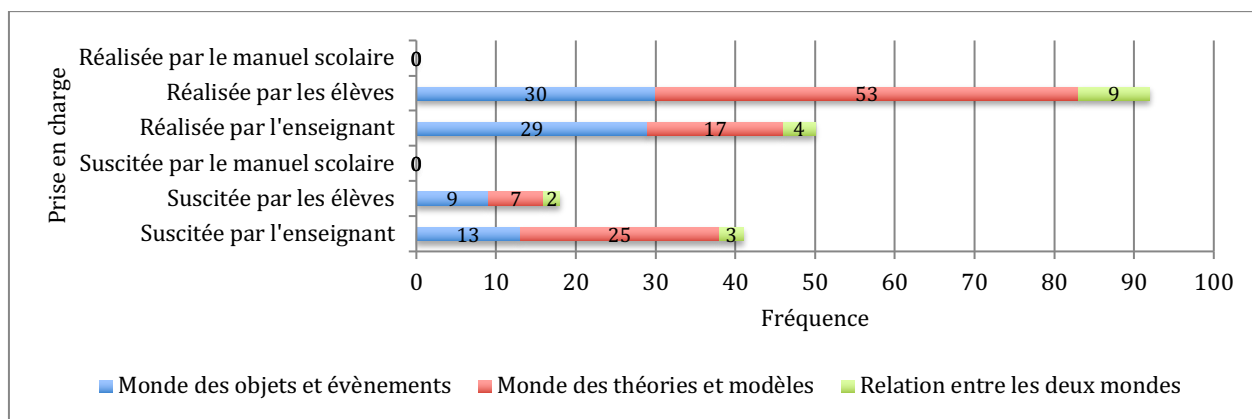


Figure 105- Tâche épistémique IDENTIFIER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à identifier :

- du matériel de laboratoire pertinent pour réaliser un montage (S2, S3) ;
- des données présentant des caractéristiques particulières dans une distribution : initiale, manquante, aberrante, etc. (S2, S3, S4, S6) ;
- des ressources pertinentes pour la compréhension et l'explication des divers mouvements étudiés en laboratoire (S4, S5, S6, S7).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à identifier :

- dans de situations expérimentales ou fictives, des unités de mesure appropriées à des grandeurs physiques, par exemple associée à la masse, au temps, à la vitesse et à l'accélération (S6, S8, S9, S10) ;
- dans des situations expérimentales ou fictives, des variables sur les axes de graphiques distance-temps, vitesse-temps ou accélération-temps (S6, S8, S9, S10) ;
- dans le manuel scolaire ou les notes de cours, des formules mathématiques pertinentes du MRU ou du MRUA pour résoudre des problèmes d'application divers (S10, S11, S12, S14).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à identifier :

- les parties du graphique vitesse-temps associées respectivement à la phase de propulsion et à la phase « après propulsion » dans un mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale (S3, S10) ;
- le tracé du graphique accélération-temps d'un mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale impliquant une forte propulsion (S10) ;
- la portion non représentée d'un graphique associée au mouvement non détecté par les sondes reliées aux capteurs photovoltaïques (S11).

La tâche épistémique ÉNONCER apparaît 172 fois dans la séquence avec une durée totale de 47 min 40 s et une durée moyenne de 17 s, cette dernière étant légèrement supérieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est suscitée ou réalisée essentiellement par les élèves, et dans une moindre proportion elle est suscitée ou réalisée par l'enseignant. La durée de la prise en charge de cette tâche est plus grande du côté des élèves (DE=30 min 28 s) que de celui de l'enseignant (DP=17 min 12 s). Cette tâche se déploie davantage dans le MTM, mais aussi en grande partie dans le MOE (**figure 106**).

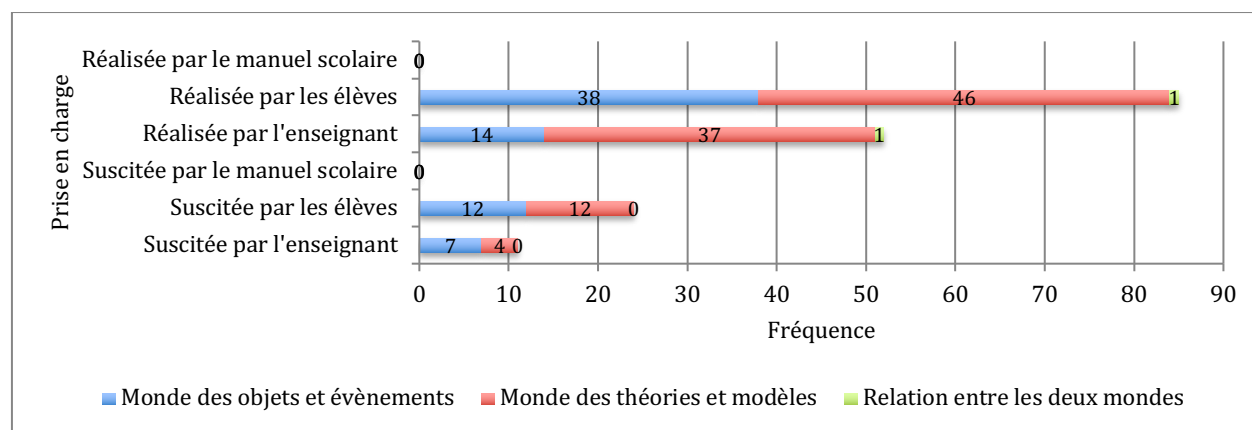


Figure 106- Tâche épistémique ÉNONCER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à énoncer :

- les facteurs expérimentés retenus, par exemple la masse du charriot, de la rondelle ou de la bille ; l'angle d'inclinaison du plan ou du propulseur ; la force de propulsion du propulseur (S2, S11, S12) ;
- les données de distance sur un ruban marqueur (S3) ;
- les données dans un problème d'application : vitesse, accélération, etc. (S9, S10, S12).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à énoncer :

- les mouvements traités lors de la séance suivante : mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale, mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion, mouvement balistique, etc. (S8, S10, S11, S12) ;
- les formules mathématiques pour calculer différentes grandeurs physiques dans un MRU ou un MRUA, par exemple la distance (S6), la portée (S14), la vitesse (instantanée ou moyenne) (S6, S8, S9, S11) et l'accélération (instantanée ou moyenne) (S9, S11, S12, S14) ;
- les formules mathématiques d'énergie cinétique et d'énergie potentielle (S10, S13).

La tâche épistémique COMPARER apparaît 142 fois dans la séquence avec une durée totale de 22 min 17 s et une durée moyenne de 8 s, cette dernière étant nettement inférieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est réalisée essentiellement par les élèves et dans une moindre proportion elle est suscitée ou réalisée par l'enseignant. La durée de la prise en charge de cette tâche est plus grande du côté des élèves (DE=15 min 5 s) que de celui de l'enseignant (DP=7 min 12 s). Cette tâche se déploie dans les trois registres de modélisation dans une proportion similaire (**figure 107**).

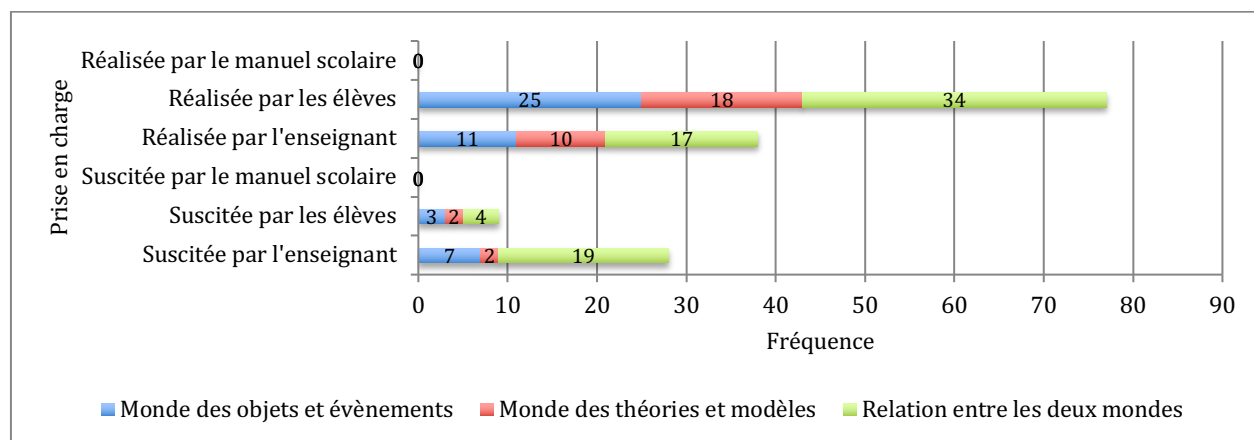


Figure 107- Tâche épistémique COMPARER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MOE, les acteurs de la classe sont appelés à comparer :

- les fonctionnements de différents dispositifs de recueil de données, par exemple le chronomètre à étincelles avec les sondes Pasco reliées à des capteurs photovoltaïques ou une interface qui fonctionne avec des unités de mesure en hertz avec une interface qui fonctionne avec des unités de mesure en millisecondes (S1, S2) ;
- des situations expérimentales étudiées au laboratoire (ex. : mouvement en chute libre, mouvement vertical ascendant avec propulsion, plan incliné ascendant avec propulsion initiale, plan incliné descendant sans propulsion initiale et plan incliné avec influence des milieux) du point de vue de la vitesse des objets, des forces de résistance ou de leurs énergies potentielle et cinétique au cours de leur mouvement (S2, S5, S8, S10, S12, S13) ;
- la progression des points sur des rubans marqueurs associés à un mouvement en chute libre et un mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale (S10).

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à comparer :

- des procédures de calcul différentes, par exemple entre la vitesse instantanée et l'accélération instantanée ou entre la vitesse moyenne et l'accélération moyenne (S4) ;
- des procédures de construction des graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps (S2) ;
- les formules mathématiques associées au mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale avec celles associées au mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale (S12).

Dans le registre de modélisation mettant en relation le MOE avec le MTM, les acteurs de la classe sont appelés à comparer :

- l'accélération expérimentale avec l'accélération théorique dans un MRU, en chute libre, en mouvement vertical ascendant et sur des mouvements sur des plans inclinés avec ou non l'influence du milieu (S3, S5, S8, S9, S10) ;
- les tracés des graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps expérimentaux avec leurs tracés théoriques correspondants pour un MRU ou un mouvement sur un plan incliné descendant (S5, S11) ;
- des situations expérimentales en regard des types de mouvement (MRU et MRUA), par exemple entre une bille en mouvement dans l'eau et une bille en mouvement dans l'air, entre une bille propulsée à un angle 0 degré avec le canon et une rondelle propulsée horizontalement avec un élastique sur une table à coussin d'air, entre une balle en mouvement vertical ascendant et une balle en chute libre (S13, S14).

La tâche épistémique FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES apparaît 96 fois dans la séquence avec une durée totale de 2 h 11 min 5 s. Elle se démarque des autres tâches épistémiques en raison de sa durée moyenne de 82 s qui est nettement supérieure à la durée moyenne des tâches épistémiques, ce qui fait en sorte qu'elle occupe une part de temps relativement importante de la séquence. Cette tâche est fortement suscitée par l'enseignant et fortement réalisée par les élèves, et dans une moindre proportion elle est suscitée par les élèves ou réalisée par l'enseignant. La durée de la prise en charge de cette tâche est plus grande du côté des élèves (DE=1 h 49 min 4 s) que de celui de l'enseignant (DP=22 min 1 s). Cette tâche se déploie uniquement dans le MTM (figure 108).



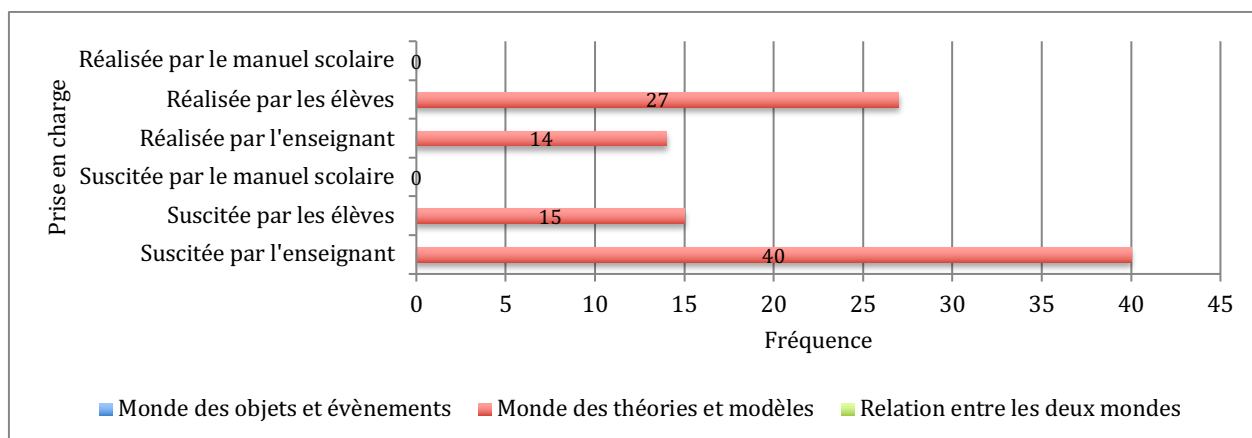


Figure 108- Tâche épistémique FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2

Dans le registre de modélisation du MTM, les acteurs de la classe sont appelés à faire des opérations formelles :

- Calculer des grandeurs physiques expérimentales dans tous les laboratoires, soit le temps moyen d'une période d'un pendule, des positions, des distances, des vitesses scalaires instantanées et moyennes, des accélérations scalaires instantanées et moyennes (S3, S4, S5, S6, S7) ;
- Calculer des grandeurs physiques théoriques dans tous les laboratoires, notamment des accélérations théoriques pour les plans inclinés ascendants ou descendants (S4, S5)
- Effectuer des opérations algébriques diverses dans la résolution de problèmes d'application en appliquant des formules mathématiques du MRU ou du MRUA appropriées dans des problèmes d'application divers (S10, S11, S14).

La tâche épistémique GÉNÉRER apparaît 20 fois dans la séquence avec une durée totale de 80 min et une durée moyenne de 5 min, cette dernière étant nettement supérieure à la durée moyenne des tâches épistémiques. Cette tâche est réalisée uniquement par les élèves et se déploie dans le MOE ou dans le MTM (**figure 109**).

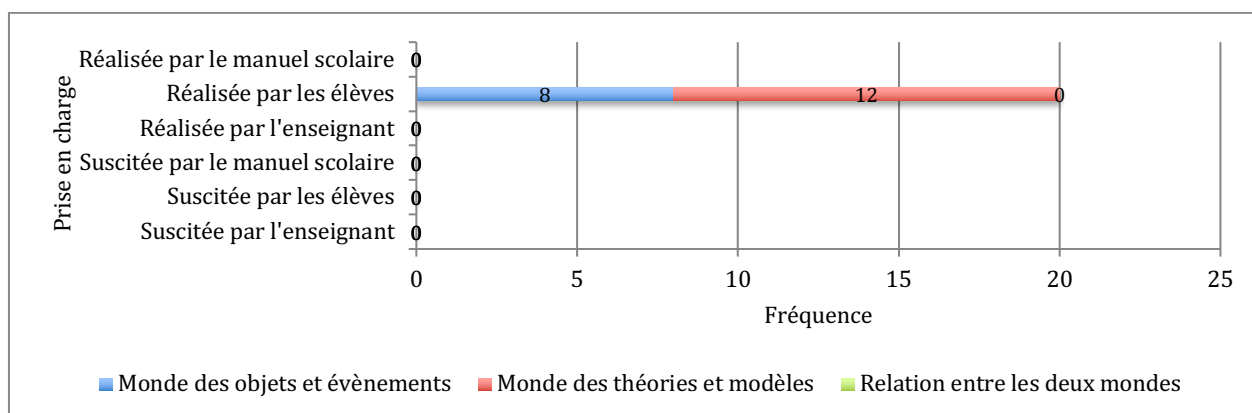


Figure 109- Tâche épistémique GÉNÉRER selon le registre de modélisation et la prise en charge dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 (facettes)

Dans le registre de modélisation du MOE, les élèves sont par exemple appelés à générer des protocoles de laboratoire. Nous considérons que l'élaboration d'un tel protocole s'inscrit dans le monde des objets et des événements. À cet égard, les élèves de la classe sont appelés à générer des protocoles de laboratoire en déterminant, en plus des buts imposés, des buts additionnels de l'expérience (choisir un facteur qui pourrait influencer une expérience et bâtir une expérience pour vérifier l'impact du facteur retenu), en prévoyant un schéma de montage, les instruments de mesure appropriés, etc. (voir le document de laboratoire *La cinématique et la dynamique en apprentissage coopératif*, [annexe 10](#)). L'élaboration des protocoles se fait essentiellement aux séances 1 (ép. 14 à 21) et 2 (ép. 22 à 50)

Dans le registre de modélisation du MTM, les élèves sont par exemple appelés à générer différentes hypothèses scientifiques au début de leur laboratoire. Nous considérons ces hypothèses comme étant des formulations qui appartiennent au monde des théories et des modèles. Les extraits suivants sont tirés des rapports de laboratoire des équipes d'élèves.

Pour le lab A-Mouvement en chute libre (S2), les élèves sont appelés à générer les hypothèses suivantes :

- « Nous croyons que la relation entre la distance et le temps sera une fonction exponentielle, car nous savons que l'objet en chute libre accélère exponentiellement » (extrait du doc du rapport de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Nous croyons que la relation entre la vitesse et le temps sera linéaire, car nous savons que la vitesse doit augmenter graduellement au rythme de 9,8 m/s par seconde » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Nous croyons que l'accélération sera constante, car nous savons que l'accélération en chute libre est toujours de 9,8 m/s<sup>2</sup> » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves).

Pour le lab C-Mouvement sur table à coussin d'air (S2), les élèves sont par exemple appelés à générer l'hypothèse suivante :

- les graphiques distances-temps, vitesses-temps et accélération sont des droites, car les taux de variation de la position ou les écarts de distance par rapport au temps sont les mêmes (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves).

Pour le lab D-Mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale (S2), les élèves sont par exemple appelés à générer l'hypothèse suivante :

- « Plus le mobile avancera sur le plan, plus sa vitesse augmentera, et par le fait même engendrera une accélération » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves).

Pour le lab F-Mouvement sur plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu (S7), les élèves sont par exemple appelés à générer les hypothèses suivantes :

- « Pour la bille dans l'air, nous pensons que plus le temps est important, plus la bille pourra prendre de la vitesse. Plus la distance est importante, plus le temps sera élevé. L'accélération sera donc constante pour faire augmenter la vitesse du mobile » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Pour la bille dans l'eau, nous pensons que plus la distance est importante, plus le temps sera élevé, mais nous pensons cependant que le frottement de la bille sur le fluide ralentira son déplacement. La courbe du graphique devrait donc être moins prononcée. Pour la vitesse, nous croyons qu'elle est croissante, mais de façon minime. L'accélération est donc presque imperceptible. De plus, nous pensons que la viscosité de la substance fluide pourrait faire varier le frottement, donc jouer sur la vitesse et l'accélération, et nous allons même jusqu'à croire que cela pourrait provoquer une décélération du mobile dans certains cas » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves).

Pour le lab G-Mouvement balistique (S2), les élèves sont par exemple appelés à générer les hypothèses suivantes :

- « Selon la théorie gravitationnelle, un corps projeté en l'air doit automatiquement retomber » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Nous savions avant de débiter ce laboratoire que lorsque l'on varie l'angle de tir, la portée atteindrait un pic optimal qui maximiserait la distance parcourue par le projectile. » (extrait du doc de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Avant de débiter ce laboratoire, on savait qu'à 90° la balle atterrirait au point de lancement, et qu'à 0°, elle ne devrait, techniquement, parcourir aucune distance » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves) ;
- « Avant de faire notre laboratoire, nous croyions que plus l'angle de tir sera grand, plus l'écart de temps le sera par le fait même » (extrait du rapport de lab de l'équipe d'élèves).

### 7.3.2 Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des tâches épistémiques

*Dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, les tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées en regard de leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus) sont, dans l'ordre décroissant, les tâches ÉVALUER, DÉCRIRE, EXPLIQUER, IDENTIFIER, ÉNONCER et COMPARER. La durée moyenne des tâches épistémiques varie considérablement selon leur nature. La durée moyenne des tâches épistémiques GÉNÉRER et FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES est nettement supérieure à la durée moyenne de l'ensemble des tâches épistémiques qui est d'environ 17 s. Si nous appréhendons les tâches épistémiques sous l'angle de leur durée, nous relevons que dans une large proportion du temps de cette séquence d'enseignement, la construction du savoir se fait par des explications, des opérations formelles ou par des évaluations. La durée moyenne relativement élevée (270 s) de la tâche GÉNÉRER met en exergue l'importance accordée par l'enseignant 2 à l'élaboration des protocoles de laboratoire par les élèves, alors que cette tâche s'avère absente dans la classe de l'enseignante 1.*

*Si dans cette séquence, le niveau taxonomique des tâches épistémiques ayant une grande fréquence d'apparition varie entre le premier et le cinquième niveau de cognition, nous*

*observons une propension de tâches épistémiques (comme la tâche COMPARER du quatrième niveau de cognition) qui relèvent de niveaux taxonomiques particulièrement élevés, ce qui indique que la construction du savoir se fait, en particulier, par des tâches épistémiques dont le niveau de complexité est relativement élevé.*

*Sur le plan thématique, les tâches épistémiques de cette séquence, comme c'est le cas de la séquence 1, se déclinent dans l'ensemble des thèmes disciplinaires et leur densité (nombre de tâches épistémiques par minute) est variable (entre 3 et 7 tâches par minute) selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues). Comme c'est aussi le cas dans la classe de l'enseignante 1, les thèmes relatifs aux modèles du mouvement (MRU, MRUA et MB) présentent une assez forte densité thématique, ce qui indique que la modélisation du mouvement des objets matériels nécessite une forte mobilisation des tâches épistémiques.*

*Quant à la prise en charge des tâches épistémiques, qu'elles soient suscitées ou réalisées par l'enseignant, elle se fait par les élèves dans près de 55 % des cas. Plus précisément, pour les 21 tâches épistémiques en jeu, 15 d'entre elles sont plus fréquemment prises en charge par les élèves. Les tâches ARGUMENTER, CLASSIFIER, COMPARER, CONCLURE, DÉCRIRE, DÉDUIRE, DÉFINIR, ÉNONCER, EXEMPLIFIER, EXPLIQUER, GÉNÉRALISER, GÉNÉRER, IDENTIFIER, INTERPRÉTER et MESURER sont davantage sous la responsabilité des élèves alors que les tâches épistémiques ÉVALUER, FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, REPRÉSENTER, SÉLECTIONNER et SIMULER le sont un peu plus sous la responsabilité de l'enseignant. Dans cette séquence, les élèves sont appelés à prendre en charge des tâches épistémiques qui relèvent de l'ensemble des six domaines de cognition.*

*Sur le plan des registres de modélisation, les tâches épistémiques prennent ancrage essentiellement dans une proportion similaire dans le MOE (40 %) ou le MTM (39 %). Dans une moindre proportion, les tâches épistémiques mettent en relation le MOE avec le MTM (21 %). Ainsi, une priorité similaire est accordée à la connaissance des objets (expérimentaux et physiques) et la maîtrise des actions réalisées sur ces objets dans le champ empirique des objets et événements et la construction des objets théoriques dans le monde des théories et des modèles. Dans cette classe, si les registres de modélisation sont mobilisés de manière variable selon la nature des tâches épistémiques, le registre du MOE y est beaucoup plus mobilisé que dans la classe de l'enseignante 1 : en plus des tâches épistémiques MESURER et SIMULER qui sont davantage ancrées dans le MOE, nous incluons les tâches épistémiques ARGUMENTER, DÉCRIRE, ÉVALUER, GÉNÉRER et SÉLECTIONNER. Ces résultats témoignent de la préoccupation de l'enseignant 2 à ce que ses élèves puissent construire un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique. Dès la première séance, l'accent est mis sur l'exploration d'objets divers (ex. : montages, matériels de laboratoire, procédures de recueils de données, etc.) lesquels sont mis en relation avec une grande diversité d'événements pouvant être modélisés par l'un ou l'autre des trois modèles du mouvement : le MRU, le MRUA et le MB.*

### 7.3.3 Configuration de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des facettes de savoir

Cette séquence d'enseignement qui s'étale sur 14 séances met en jeu 745 facettes de savoir. La distribution des groupes de facettes se fait d'une manière relativement continue sur l'ensemble des séances, en ce sens que les groupes de facettes se distribuent sur l'ensemble des séances. Cependant, c'est dans la seconde moitié de la séquence, c'est-à-dire dans les séances 7 à 14 que se fait la plus grande introduction des facettes de savoir (**figure 110**). Les **figure 110 et 111** montrent que les groupes de facettes MRU, MRUA et Mouvement balistique prédominent largement sur les autres groupes de facettes quant à leur fréquence d'apparition totale dans cette séquence. La **figure 111** présente la distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires. Elle met en évidence des écarts importants entre les groupes de facettes. Ces groupes se distribuent dans des proportions variables selon les thèmes disciplinaires retenus par l'enseignant. Certains thèmes disciplinaires mobilisent davantage des groupes de facettes particuliers. C'est le cas du thème 1-MRU qui mobilise essentiellement le groupe de facettes VITESSE, du thème 2-MRUA qui mobilise essentiellement le groupe de facette MRUA, du thème 3-MRU et MRUA qui mobilise essentiellement les groupes de facettes MRU et MRUA, et du thème 4-Mouvement balistique qui mobilise essentiellement le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE. Ce résultat montre une cohérence conceptuelle importante dans l'introduction des facettes de savoir en relation avec les thèmes disciplinaires retenus.

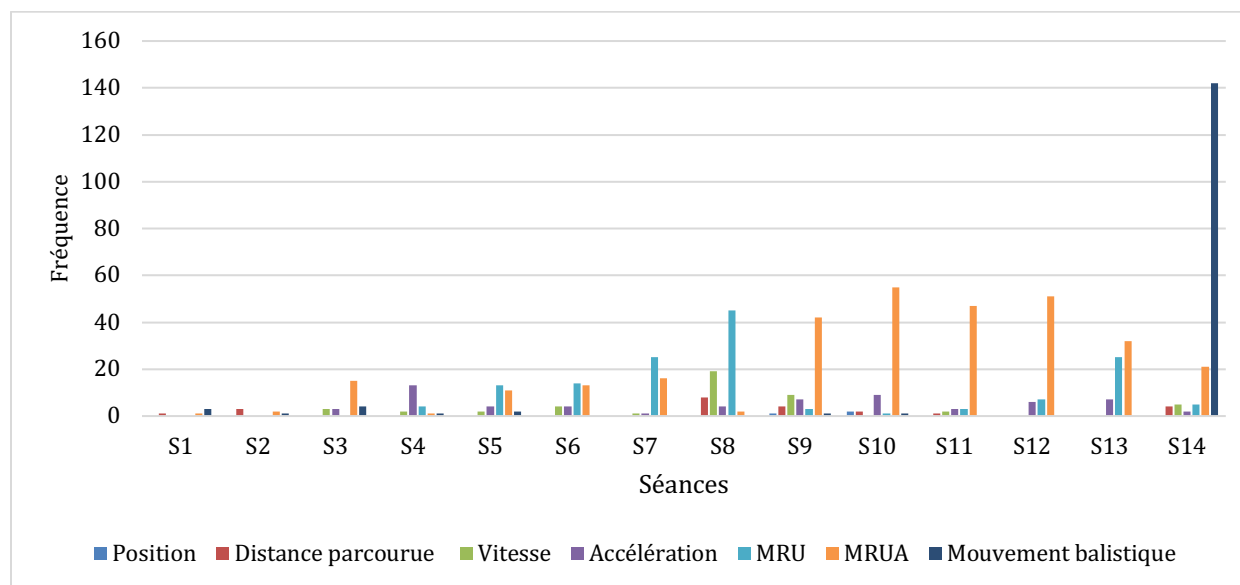


Figure 110- Distribution des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignant 2

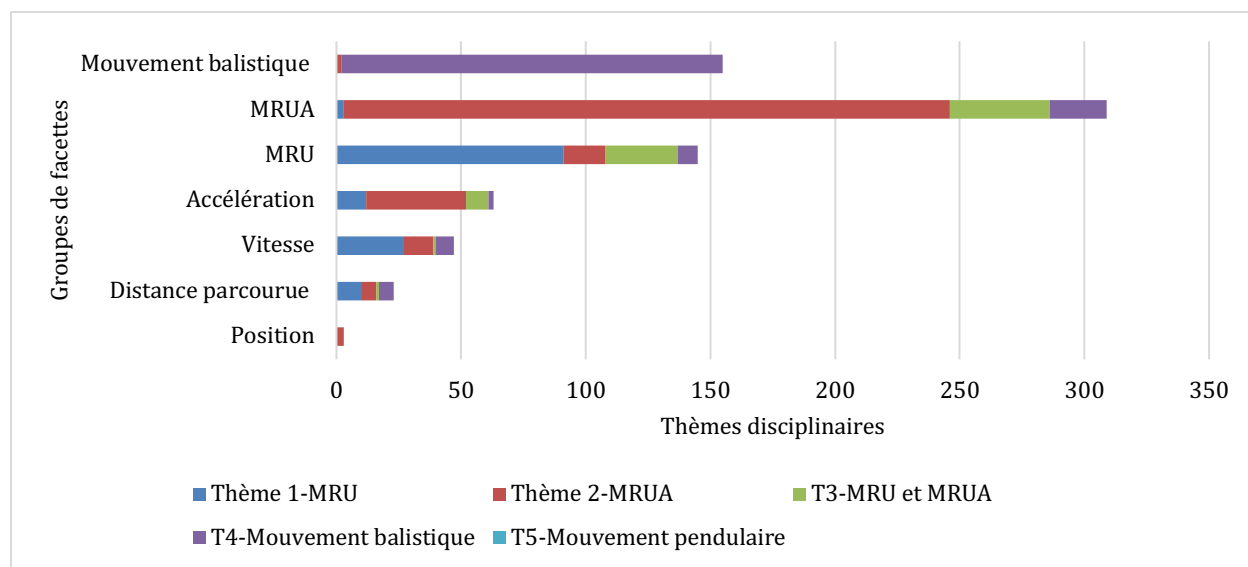


Figure 111- Distribution des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Le **tableau 53** montre que la densité des groupes de facettes (nombre de facettes introduites d'un même groupe à l'heure) est très variable selon les séances. En considérant que la seconde moitié des séances de cette séquence, il apparaît que les séances 7 et 8 sont très denses pour le groupe de facettes MRU dont les densités respectives dans ces séances sont de 22,3 et de 39,1 facettes à l'heure. Les séances 9, 10, 11 et 12 sont très denses pour les groupes de facettes MRUA dont les densités respectives dans ces séances sont de 31,4 ; 50 ; 41,6 et 43,2. Enfin, la séance 10 est très dense pour le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE avec une densité de 120 facettes à l'heure. Quant au **tableau 54**, il met en évidence la grande variabilité de la densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires : les groupes de facettes VITESSE ( $D=12,2$ ) et MRU sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1 ; le groupe de facettes MRUA ( $D=29,8$ ) est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 2 ; les groupes de facettes MRU ( $D=13,5$ ) et MRUA ( $D=18,6$ ) sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3 ; et le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE ( $D=65,1$ ) est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 4. Aucun groupe de facettes n'est cependant mobilisé dans le thème 5-Mouvement pendulaire. Globalement, au niveau de la séquence (tous les thèmes disciplinaires confondus), un groupe de facettes se démarque nettement des autres quant à sa plus grande densité moyenne. Il s'agit du groupe de facettes MRUA dont la densité moyenne est de 20 facettes à l'heure sur la séquence (**tableau 54**).

Tableau 53 : Densité des groupes de facettes selon les séances chez l'enseignant 2

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	DM
<b>Position</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0.8	1.8	0	0	0	0	<b>0.2</b>
<b>Distance parcourue</b>	0.8	2.6	0	0	0	0	0	7	3.3	1.8	0.9	0	0	2.2	<b>1.5</b>
<b>Vitesse</b>	0	0	2.4	1.6	1.6	3.2	0.9	16.5	7.3	0	1.8	0	0	4.2	<b>3.1</b>
<b>Accélération</b>	0	0	2.4	10.4	3.2	3.25	0.9	3.5	5.7	8.2	2.7	5.1	5	1.7	<b>4.1</b>
<b>MRU</b>	0	0	0	3.2	10.4	11.4	22.3	39.1	2.4	0.9	2.7	5.9	23.8	4.2	<b>9.5</b>
<b>MRUA</b>	0.8	1.7	12.2	0.8	8.8	10.6	14.2	1.7	34.1	50	41.6	43.2	22.9	17.8	<b>20.1</b>
<b>Mouvement balistique</b>	2.3	0.9	3.3	0.8	1.6	0	0	0	0.8	0.9	0	0	0	120	<b>10.1</b>

Tableau 54 : Densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

	Thème 1 MRU	Thème 2 MRUA	T3 MRU et MRUA	T4 Mouvement balistique	T5 Mouvement pendulaire	DM
<b>Position</b>	0	0.4	0	0	0	<b>0.2</b>
<b>Distance parcourue</b>	4.5	0.7	0.5	2.6	0	<b>1.5</b>
<b>Vitesse</b>	12.2	1.4	0.5	3	0	<b>3.1</b>
<b>Accélération</b>	5.4	4.9	4.2	0.9	0	<b>4.1</b>
<b>MRU</b>	41	2.1	13.5	3.4	0	<b>9.5</b>
<b>MRUA</b>	1.4	29.8	18.6	9.8	0	<b>20.1</b>
<b>Mouvement balistique</b>	0	0.25	0	65.1	0	<b>10.1</b>

Sur le plan du contexte de traitement des thèmes disciplinaires, la **figure 112** met en évidence que les groupes de facettes sont tous introduits dans la présentation ou la réalisation des laboratoires. Cependant, les moments de présentation des laboratoires sont de loin ceux où les facettes de savoir sont les plus fréquemment introduites pour tous les groupes de facettes, sauf pour le groupe ACCÉLÉRATION dont ses facettes font l'objet d'une introduction plus importante dans les moments de réalisation des laboratoires. La fréquence d'apparition des facettes est beaucoup plus faible dans les moments de théorisation menés par l'enseignant.

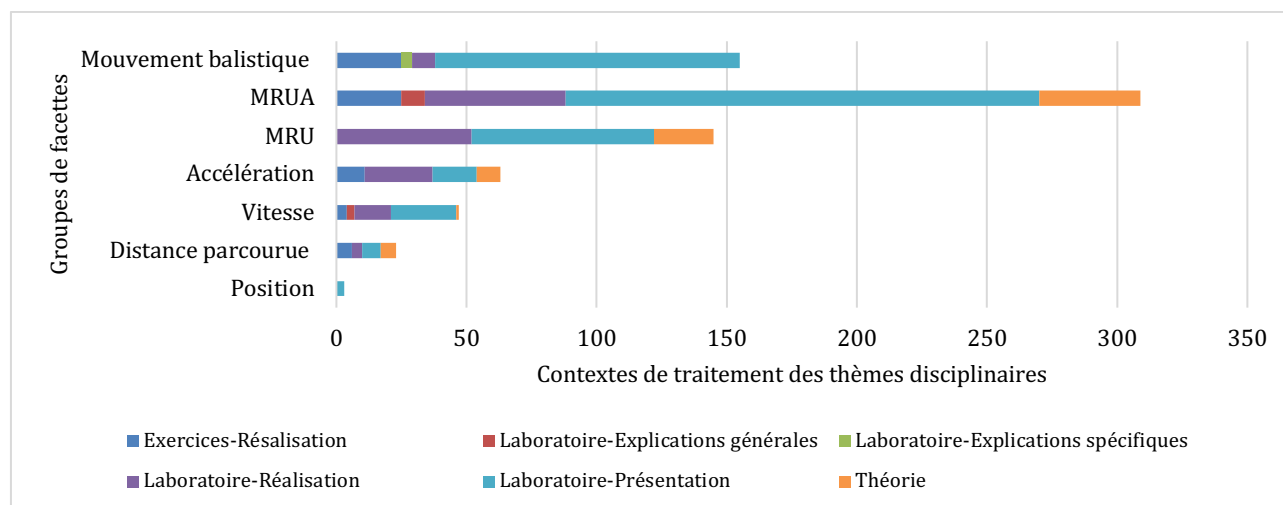


Figure 112- Distribution des groupes de facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Sur le plan de la source d'émergence des facettes de savoir, la **figure 113** met en évidence une variabilité importante selon les groupes de facettes. Les facettes du groupe VITESSE sont celles qui émergent le plus souvent de manière décontextualisée. Les facettes du groupe DISTANCE PARCOURUE sont celles qui émergent le plus souvent de situations fictives. Les facettes des groupes Accélération, MRU et MRUA sont celles qui émergent le plus souvent de situations expérimentales. Les facettes du groupe MOUVEMENT BALISTIQUE sont celles qui émergent le plus souvent de ressources didactiques. Seules quelques facettes des groupes MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE émergent de démonstrations expérimentales.

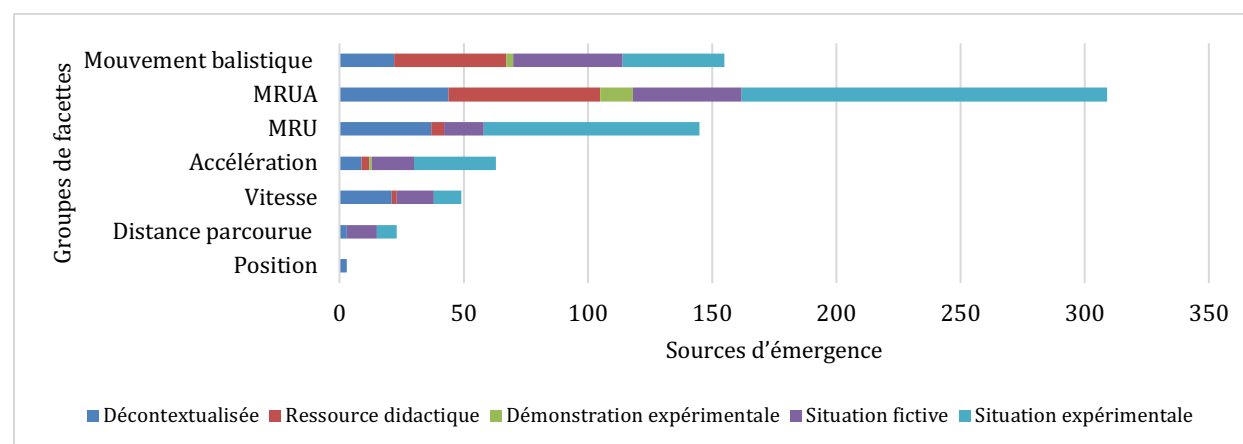


Figure 113- Distribution des groupes de facettes selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2



Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, les groupes de facettes sont principalement introduits dans le cadre d'une démarche de modélisation, en particulier dans la phase *Conceptualiser et déployer*. Seulement quelques facettes des groupes MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE sont introduites dans la phase de problématisation de cette démarche ou en marge de celle-ci (figure 114).

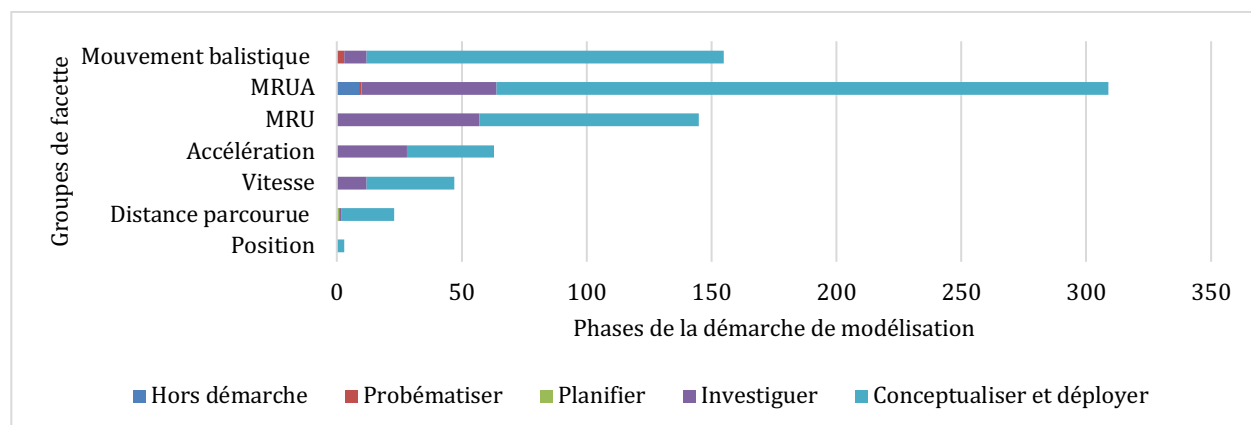


Figure 114- Distribution des groupes de facettes selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2

Trois types de facettes se démarquent des autres par leur fréquence d'apparition sur la séquence : les facettes conceptuelles, suivies des facettes symboliques-graphiques et des facettes symboliques-algébriques. Ce sont de loin les facettes conceptuelles qui prédominent dans la plupart des groupes de facettes : ACCÉLÉRATION, MRU, MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE. Les facettes procédurales prédominent dans les groupes DISTANCE PARCOURUE et VITESSE et sont fortement présentes dans le groupe ACCÉLÉRATION. Dans le groupe MRUA, les facettes symboliques-algébriques et graphiques font l'objet d'une introduction relativement importante (figure 115).

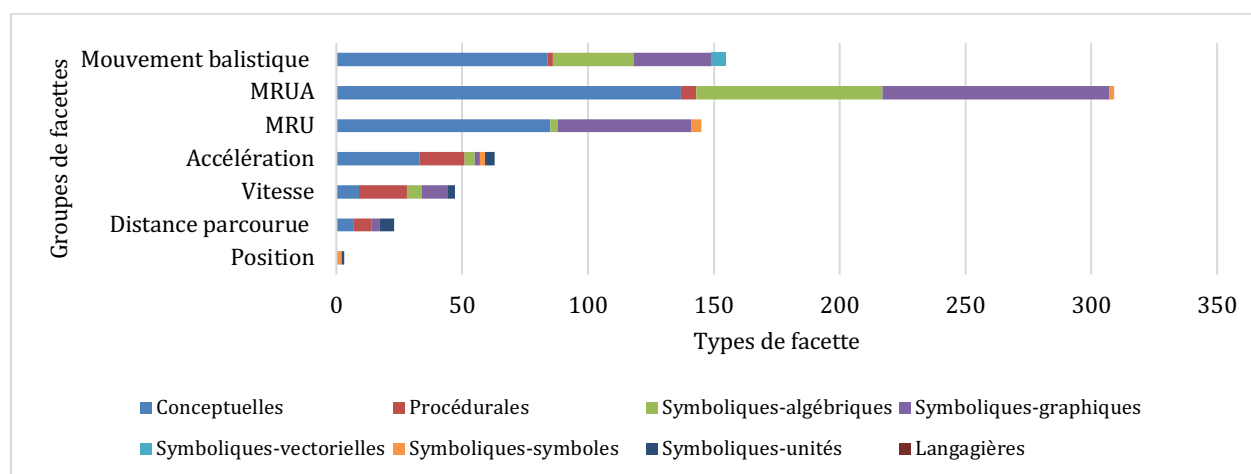


Figure 115- Distribution des groupes de facettes selon leurs types chez l'enseignant 2

Enfin, sur le plan de la responsabilité des acteurs pour la prise en charge des facettes de savoir, nous constatons que cette responsabilité est largement du côté des élèves ou elle est partagée entre l'enseignant et les élèves, et ce, pour tous les groupes de facettes (**figure 116**). Dans cette séquence d'enseignement de la cinématique et de la dynamique, la responsabilité du savoir est clairement attribuée aux élèves. Dans la sous-section suivante, nous présentons de manière plus détaillée les résultats en termes de facettes de savoir en présentant notamment des exemples typiques pour illustrer chacun de ces groupes de facettes.

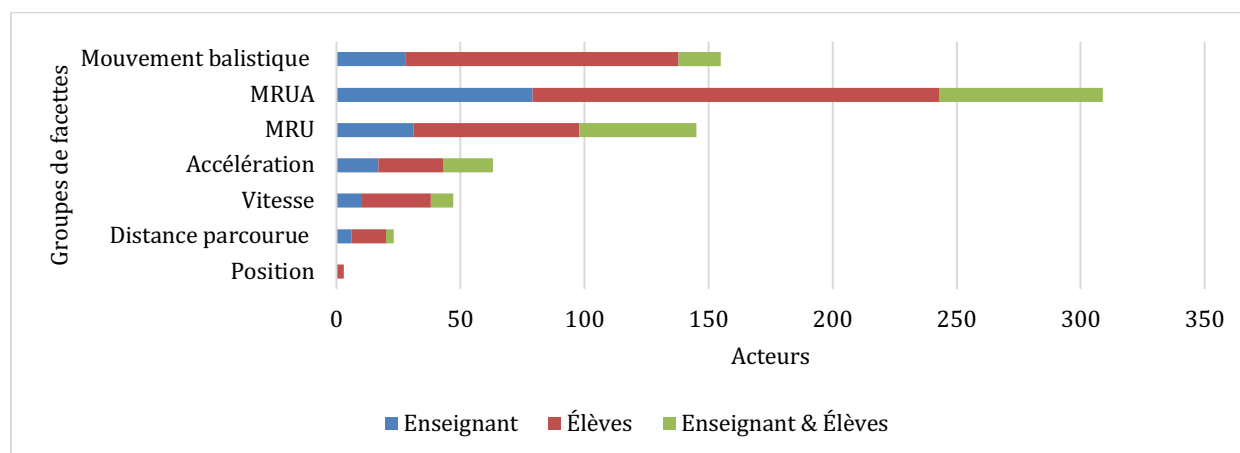


Figure 116- Distribution des groupes de facettes selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2

Dans les sous-sections suivantes, nous présentons de manière plus détaillée les résultats en regard des facettes de savoir qui prédominent quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence. Nous illustrons par des exemples typiques chacun de ces groupes de facettes. Dans l'**annexe 25**, nous présentons les résultats en lien avec les groupes de facettes POSITION, DISTANCE PARCOURUE et ACCÉLÉRATION.

### 7.3.3.1 Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU)

Le groupe de facettes MRU est constitué de 23 facettes dont 11 conceptuelles, 2 symboliques-algébriques, 10 symboliques-graphiques, et ce, avec une fréquence d'apparition totale de 145 facettes pour l'ensemble des séances (**annexe 20, tableau 11**).

Si les facettes MRU sont introduites dans presque toutes les séances, c'est dans la deuxième moitié de la séquence lors de la présentation des laboratoires qu'elles le sont davantage dans les séances 7 (N=25), 8 (N=45) et 13 (N=13) (**figure 117**). Dans le thème 1-MRU, la fréquence

d'apparition des facettes MRU est très élevée ( $N=91$ ), ce qui indique que la cohérence thématique du savoir est bien assurée. Le thème 2-MRUA ( $N=17$ ) et le thème 3-MRU et MRUA ( $N=29$ ) sont aussi particulièrement riches en regard des facettes de ce groupe (**figure 118**).

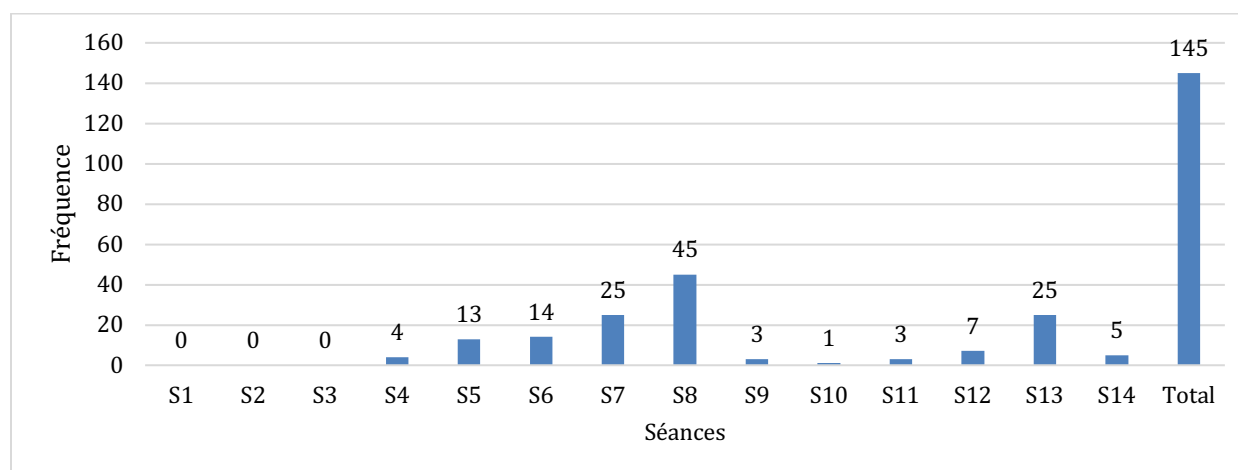


Figure 117- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les séances chez l'enseignant 2

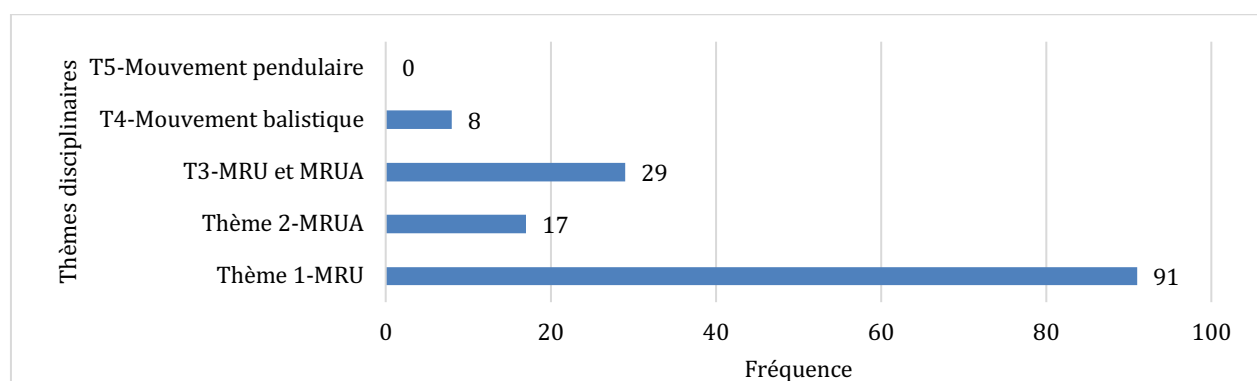


Figure 118- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

La densité des facettes MRU selon les séances est assez variable selon les séances : elle très faible dans la plupart des séances (séances 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 11, 12 et 14 où elle varie entre 0 et 5,9), faible dans les séances 5 et 6 (10,4 et 11,4), moyenne dans les séances 7 et 13 (22,3 et 23,8) et forte dans la séance 8 (39,1) (**tableau 55**). Quant à la densité thématique, elle est aussi relativement variable selon les thèmes disciplinaires : elle est très faible pour les thèmes 2, 4 et 5 ( $D=2,1$  ;  $3,4$  ;  $0$ ), faible pour thème 3-MRU et MRUA ( $D=13,5$ ), mais elle est forte pour le thème 1-MRU ( $D=41$ ). Globalement, la densité moyenne des facettes MRU est de 9,5 au niveau de la séquence (**tableau 56**).

Tableau 55 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les séances chez l'enseignant 2

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	DM
0	0	0	3.2	10.4	11.4	22.3	39.1	2.4	0.9	2.7	5.9	23.8	4.2	9.5

Tableau 56 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Thème 1-MRU	Thème 2-MRUA	T3-MRU et MRUA	T4-Mouvement balistique	T5-Mouvement pendulaire	Densité moyenne
41	2.1	13.5	3.4	0	9.5

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes MRU se déploient essentiellement dans les laboratoires (122 facettes sur 145 avec 52 facettes pour la réalisation et 70 facettes pour la présentation), et dans une moindre proportion dans des moments de théorisation (23 facettes sur 145) (**figure 119**).

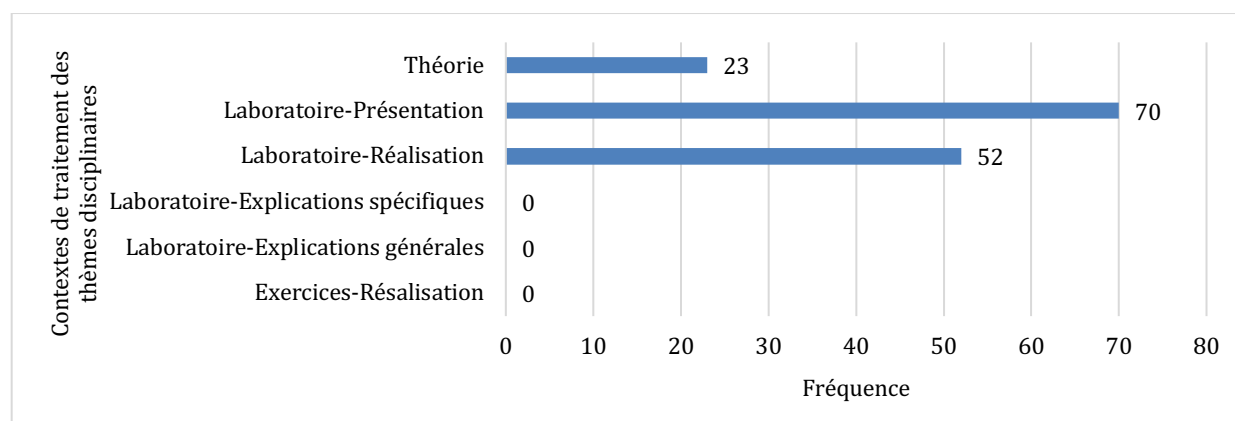


Figure 119- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Les facettes MRU sont essentiellement introduites à travers des situations expérimentales (87 facettes sur 145) et de manière décontextualisée (37 facettes sur 145), et dans une moindre proportion dans des situations fictives (16 facettes sur 145) ou en s'appuyant sur des ressources didactiques (5 facettes sur 145) (**figure 120**). Les facettes de ce groupe émergent dans la phase *Investiguer* (57 facettes sur 145) ou dans la phase *Conceptualiser et déployer* (88 facettes sur 145) de la démarche de modélisation (**figure 121**).

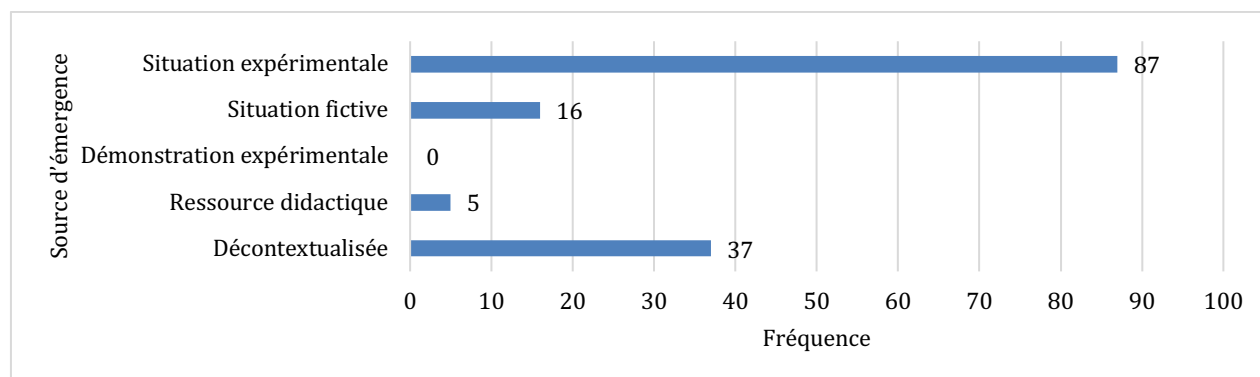


Figure 120- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2

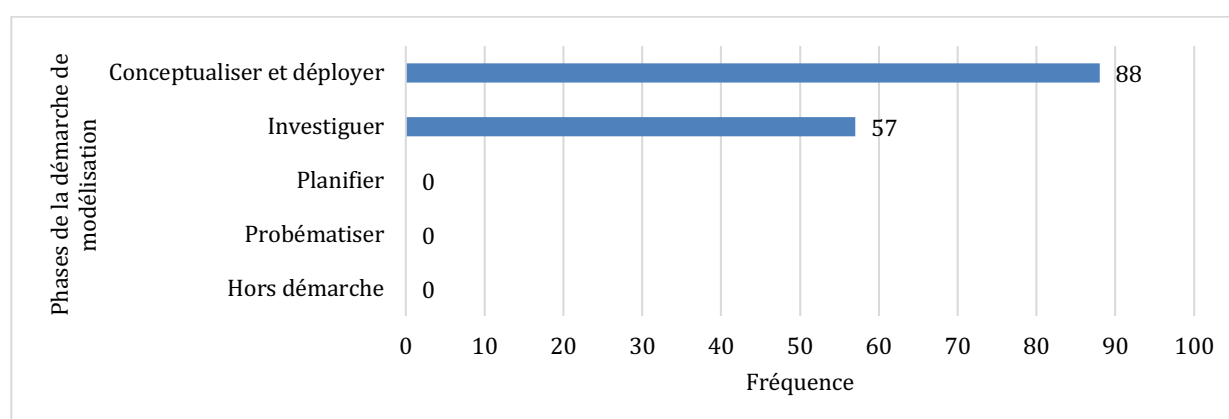


Figure 121- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2

Les types de facettes MRU les plus fréquemment introduits dans la séquence sont les facettes MRU-conceptuelles (85 facettes sur 145) et les facettes MRU-GRAPHIQUES (53 facettes sur 145). Seules 4 facettes MRU-SYMBOLIQUES et 3 facettes MRU-ALGÈBRIQUES sont dénombrées (figure 122).

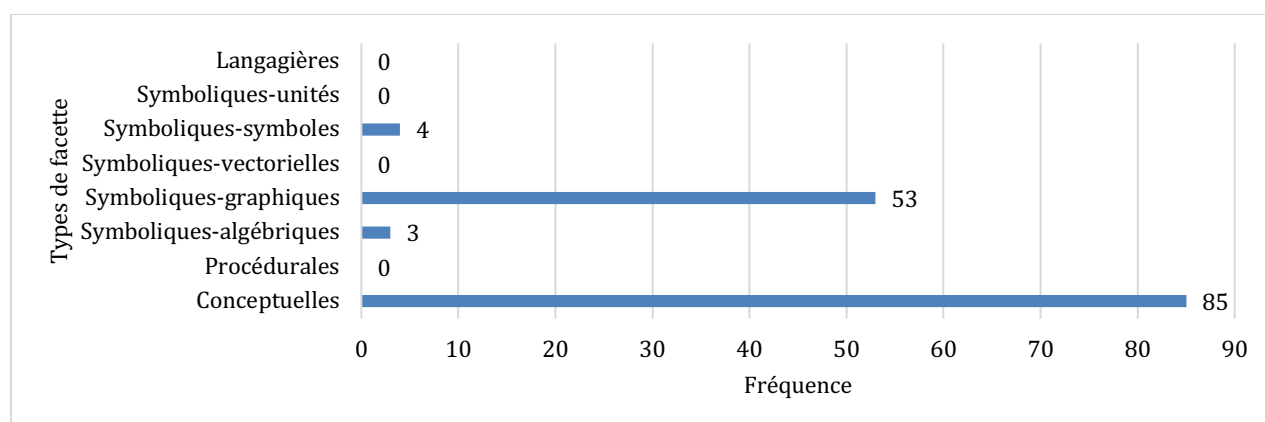


Figure 122- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon leurs types chez l'enseignant 2

Les facettes MRU sont essentiellement prises en charge par les élèves seuls (67 facettes sur 145) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (47 facettes sur 145). Dans une moindre proportion, c'est l'enseignant qui prend en charge les facettes de savoir de ce groupe (31 facettes sur 145) (**figure 123**).

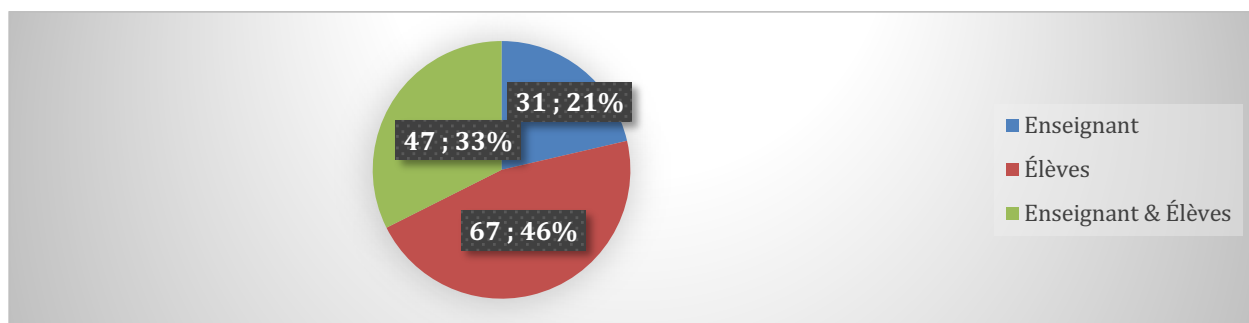


Figure 123- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2

Parmi les 23 facettes MRU, 15 ont une continuité très faible et 8 facettes se démarquent de ces dernières avec 1 facette ayant une continuité faible, 4 ayant une continuité moyenne et 2 ayant une continuité très forte (avec une fréquence d'apparition de 20 facettes et plus sur la séquence) (**annexe 20, tableau 11**). Ces facettes conceptuelles et graphiques portent sur le sens du MRU et la grandeur de la vitesse et de l'accélération d'un mobile en MRU, sur la description du tracé et sur la nature de la relation des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU.

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la facette MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, le mouvement ou la trajectoire du mobile est en ligne droite » introduite 6 fois dans les séances 7 et 8 ; de la facette MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, la grandeur de la vitesse est constante dans le temps » introduite 30 fois dans les séances 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, et 13 ; de la facette MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, l'accélération (instantanée) est nulle en tout temps » introduite 25 fois dans les séances 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13 et 14 ; et de la facette MRU-CONCEPTUELLE « Dans un MRU, l'accélération moyenne est nulle » qui est introduite 11 fois dans les séances 5, 7, 8 et 9.

Pour les facettes graphiques, il s'agit de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique position-temps d'un mobile en MRU est une droite oblique » introduite 13 fois dans les séances 6, 7, 8, 13

et 14 ; de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique vitesse-temps d'un mobile en MRU est une droite horizontale » introduite 11 fois dans les séances 6, 7, 8, 9, 13 et 14 ; de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique vitesse-temps d'un mobile en MRU est une fonction constante » qui est introduite 5 fois dans les séances 5 et 8, et de la facette MRU-GRAPHIQUE « Le graphique accélération-temps d'un objet en MRU est droite horizontale nulle » introduite 11 fois dans les séances 4, 8, 9, 13 et 14.

L'exemple suivant illustre quelques facettes du groupe de facettes MRU en mettant en relation les tâches épistémiques qui les sous-tendent. Dans l'épisode 185 de la séance 8, l'équipe d'élèves du laboratoire C- Mouvement sur une table à coussin d'air présente leur laboratoire dans la phase de *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation. Au point de départ de la présentation, une élève de l'équipe énonce le modèle du mouvement abordé, le mouvement rectiligne uniforme (MRU), et définit ce mouvement par différentes caractéristiques : un mouvement dont la trajectoire d'un objet est en ligne droite et dont la distance parcourue entre deux intervalles de temps égaux consécutifs est constante. Elle sollicite les élèves de la classe à évaluer leur compréhension de la définition de ce mouvement et de son côté l'enseignant sollicite les élèves de la classe à identifier le MRU dans les laboratoires qui seront présentés ultérieurement, notamment le laboratoire sur les plans inclinés descendants avec influence du milieu (air/eau) et le laboratoire sur le mouvement balistique. Par la suite, les élèves de l'équipe représentent le graphique distance-temps d'un mobile en MRU, identifient les unités des axes vertical et horizontal et décrivent le tracé de ce graphique (une droite oblique). Une fois le graphique représenté, ils effectuent une opération formelle, le calcul du taux de variation de ce graphique, et expliquent une caractéristique majeure du MRU. Dans un MRU, le taux de variation d'un graphique de distance donne toujours la vitesse moyenne. Puis, ils évaluent positivement le graphique distance-temps obtenu expérimentalement à partir du graphique théorique. Un travail similaire est effectué par la suite avec les graphiques vitesse-temps et accélération-temps d'un mobile en MRU avec en plus l'explication de procédures pour calculer la vitesse moyenne et l'accélération moyenne de mobile à partir de ces représentations graphiques. Ce travail conduit les élèves à expliquer que dans un MRU, la vitesse moyenne est toujours égale à la vitesse instantanée, que la grandeur de la vitesse est constante dans le temps et que l'accélération (instantanée ou moyenne) est nulle (**figure 124**).

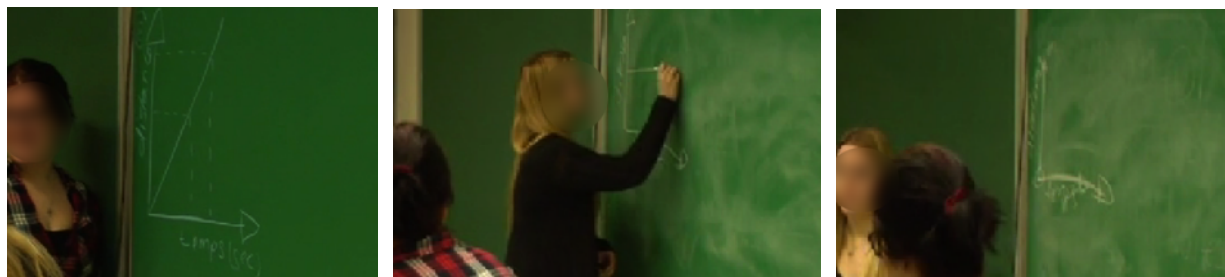


Figure 124- Représentation et description des tracés des graphiques distance-temps, vitesses-temps et accélération-temps dans un MRU par les élèves du laboratoire C (séance 8, ens. 2)

### 7.3.3.2 Groupe de facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA)

Le groupe de facettes MRUA est de loin le groupe de facettes le plus riche quant à la grande diversité des facettes qui le composent. Il est constitué de 65 facettes dont 27 conceptuelles, 11 symboliques-algébriques, 25 symboliques-graphiques, 1 procédurale, 1 symbolique-symbole, et ce, avec une fréquence d'apparition totale de 320 facettes pour l'ensemble des séances ([annexe 20, tableau 12](#)).

Si les facettes MRUA sont introduites dans presque toutes les séances, c'est dans la deuxième moitié de la séquence, lors de la présentation des laboratoires, qu'elles le sont davantage, et plus particulièrement dans les séances 9 (N=42), 10 (N=55), 11 (N=47) et 12 (N=51) ([figure 125](#)). C'est dans le thème 2-MRUA (N=254) que la fréquence d'apparition des facettes MRUA est la plus élevée, ce qui indique que la cohérence thématique du savoir est bien assurée. Le thème 3-MRU et MRUA (N=40) et le thème 4-Mouvement balistique (N=23) sont aussi particulièrement riches en termes des facettes de ce groupe ([figure 126](#)).

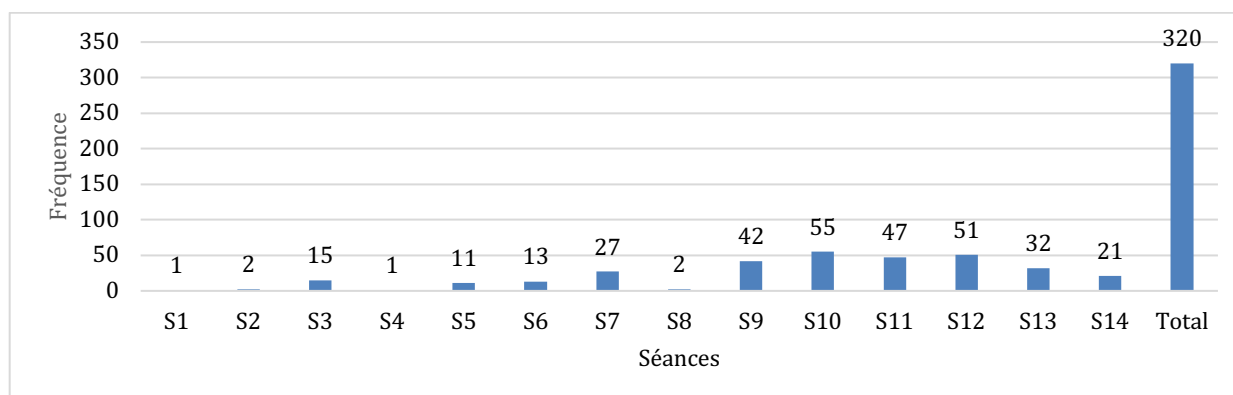


Figure 125- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les séances chez l'enseignant 2



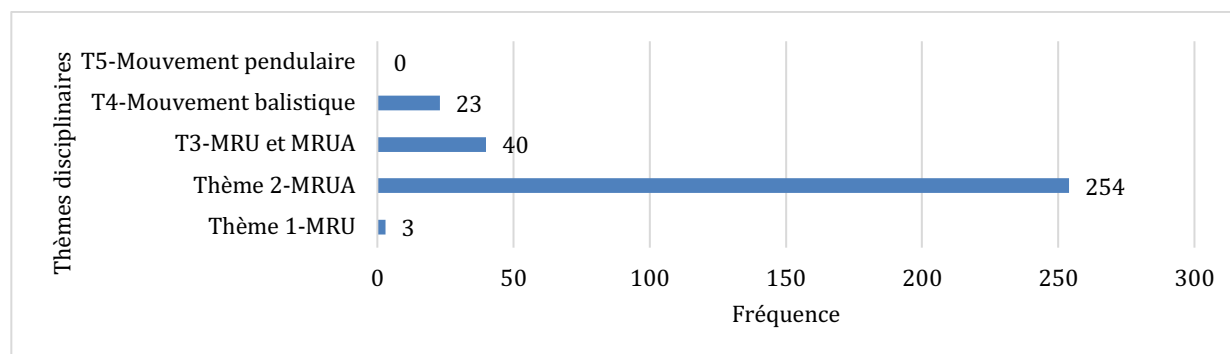


Figure 126- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

La densité des facettes MRUA est très variable selon les séances : elle est très faible dans les séances 1, 2, 4, 5 et 8 (avec une variation entre 0,8 et 8,8), faible dans les séances 3, 6, 7 et 14 (avec une variation entre 10,6 et 17,8), moyenne dans la séance 13 (D=22,9), forte dans la séance 9 (D=34,1) et très forte dans les séances 11 et 12 (D=41,6 et 43,2) (**tableau 57**). Quant à la densité thématique, elle est aussi relativement variable selon les thèmes disciplinaires : elle est très faible pour les thèmes 1, 4 et 5 (D=1,4 ; 9,8 ; 0), faible pour thème 3-MRU et MRUA (D=18,6) et moyenne pour le thème 2-MRUA (D=30,2). Globalement, la densité moyenne des facettes MRUA est de 20,9 au niveau de la séquence (**tableau 58**).

Tableau 57 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les séances chez l'enseignant 2

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	DM
0.8	1.7	12.2	0.8	8.8	10.6	24.1	1.7	34.1	50	41.6	43.2	22.9	17.8	<b>20.9</b>

Tableau 58 : Densité des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Thème 1-MRU	Thème 2-MRUA	T3-MRU et MRUA	T4-Mouvement balistique	T5-Mouvement pendulaire	Densité moyenne
1.4	30.2	18.6	9.8	0	<b>20.9</b>

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes MRUA se déploient essentiellement dans les laboratoires (256 facettes sur 320 dont 9 pour les explications générales, 65 pour la réalisation et 182 pour la présentation), et dans une moindre proportion, dans

des moments de théorisation (39 facettes sur 320) et d'exercisation (25 facettes sur 320) (**figure 127**).

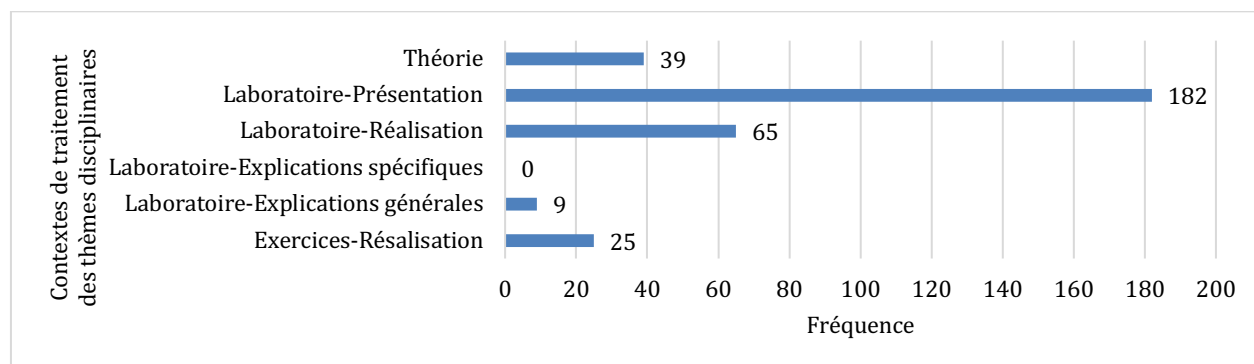


Figure 127-Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Les facettes MRUA sont essentiellement introduites à travers des situations expérimentales (158 facettes sur 320). Dans une proportion moindre, elles sont déployées en s'appuyant sur des ressources didactiques (61 facettes sur 320), dans des situations fictives (44 facettes sur 320), de manière décontextualisée (44 facettes sur 320) ou encore dans le cadre de démonstrations expérimentales (13 facettes sur 320) (**figure 128**).

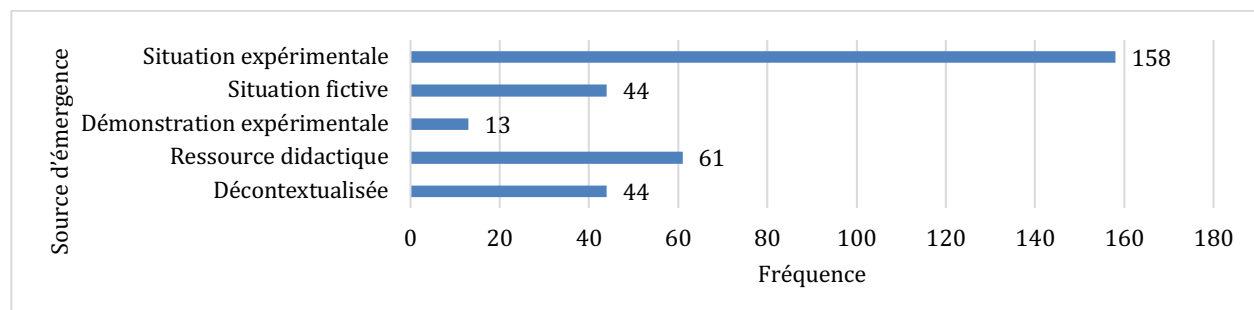


Figure 128- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2

Les facettes de ce groupe émergent en grande partie de la démarche de modélisation, plus particulièrement des phases *conceptualiser et déployer* (246 facettes sur 320) et *investiguer* (64 facettes sur 320). Une seule facette de ce groupe émerge dans la phase problématiser et 9 autres émergent en dehors de la démarche de modélisation (**figure 129**).

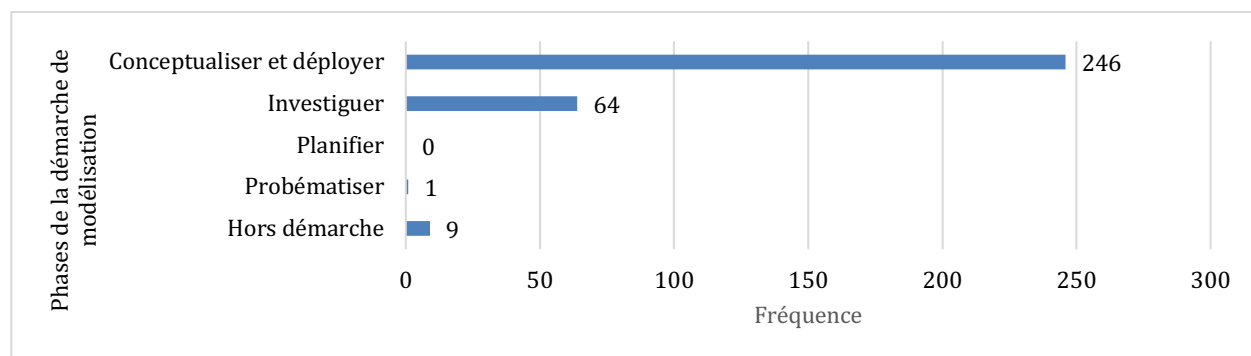


Figure 129- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2

Les types de facettes MRUA les plus fréquemment introduits dans la séquence sont les facettes MRUA-CONCEPTUELLES (138 facettes sur 320), suivis des facettes MRUA-GRAPHIQUES (98 facettes sur 320) et des facettes MRUA-ALGÈBRIQUES (76 facettes sur 320). Quelques facettes MRUA-PROCÉDURALES (6 facettes sur 320) et facettes MRUA-SYMBOLIQUES (2 facettes sur 320) sont recensées ([figure 130](#)).

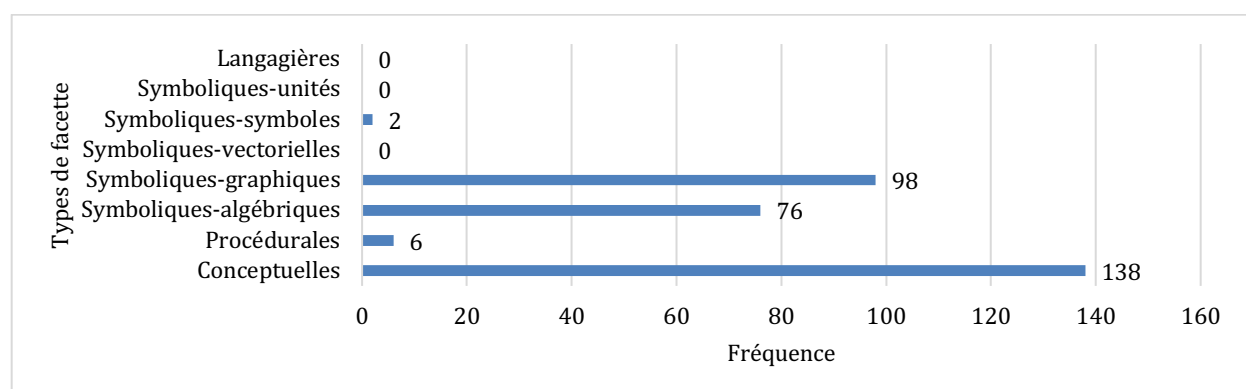


Figure 130- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon leurs types chez l'enseignant 2

Les facettes MRUA sont essentiellement prises en charge par les élèves seuls (175 facettes sur 320). Dans une moindre proportion, elles sont prises en charge par l'enseignant seul (79 facettes sur 320) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (66 facettes sur 320) ([figure 131](#)).

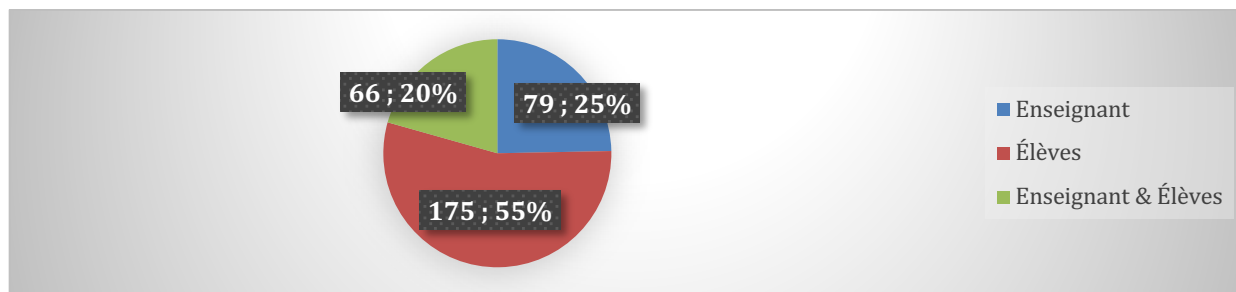


Figure 131- Distribution des facettes MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2

Parmi les 65 facettes MRUA, 44 ont une continuité très faible et donc 21 facettes de ce groupe se démarquent de ces dernières avec 13 facettes ayant une continuité faible, 7 ayant une continuité moyenne et 1 ayant une continuité très forte. Ces facettes conceptuelles, algébriques, graphiques et procédurales portent sur le sens des mouvements de mobiles associés au MRUA (chute libre, mouvement sur un plan incliné, etc.), la grandeur de la vitesse ou de l'accélération dans ces mouvements, les relations algébriques ou les tracés des graphiques qui leur sont associés ainsi que sur des procédures pour calculer des grandeurs physiques dans ces mouvements ([annexe 20, tableau 12](#)).

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un MRUA, la grandeur de l'accélération est constante en tout temps » introduite 5 fois dans les séances 10 et 11 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Le MOUVEMENT SUR UN PLAN INCLINÉ est un cas particulier du MRUA » introduite 8 fois dans les séances 4, 6, 11 et 13 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « La CHUTE LIBRE est un mouvement subissant seulement la gravité » introduite 12 fois dans les séances 9, 10 et 11 ; de la facette MRUA-conceptuelle « Le MOUVEMENT VERTICAL ASCENDANT AVEC PROPULSION INITIALE est composé d'une phase de propulsion avec accélération positive et d'un mouvement vertical ascendant » introduite 11 fois dans les séances 9, 10, 11, 12 et 14 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Le module de l'accélération d'un mobile en CHUTE LIBRE ou en MOUVEMENT VERTICAL ASCENDANT AVEC PROPULSION INITIALE près de la surface terrestre est d'environ  $-9,8 \text{ m/s}^2$  » introduite 24 fois dans les séances 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12 et 13 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement en CHUTE LIBRE (sans propulsion initiale), la vitesse initiale est nulle » introduite 11 fois dans les séances 9, 10, 11, 12 et 14 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un MOUVEMENT VERTICAL ASCENDANT AVEC PROPULSION INITIALE, la vitesse diminue

de façon régulière en montant » introduite 7 fois dans les séances 7, 8 et 10, de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement vertical ascendant, la vitesse d'un mobile est nulle à la fin de son mouvement ascendant » introduite 5 fois dans les séances 7, 9, 10, 11 et 12 ; de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement en CHUTE LIBRE ou un MOUVEMENT VERTICAL ASCENDANT AVEC PROPULSION INITIALE, la variation de la vitesse ou l'accélération est constante » introduite 10 fois dans les séances 7, 9, 10, 11 et 14 ; et de la facette MRUA-CONCEPTUELLE « Sur un PLAN INCLINÉ, l'accélération varie selon l'angle d'inclinaison du plan » introduite 8 fois dans les séances 5, 11 et 12.

Pour les facettes algébriques, il s'agit de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un mouvement sur un PLAN INCLINÉ, la formule de l'accélération scalaire est  $a = 9,8 \sin \theta$ , avec  $\theta$  : angle du plan incliné » introduite 8 fois dans les séances 7, 11, 12 et 13 ; de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la position, l'accélération et le temps (PAT) est :  $x_f = x_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} a \Delta t^2$  » introduite 11 fois dans les séances 6, 8, 10, 11, 12 et 13 ; de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la position, la vitesse et le temps (PVT) est :  $x_f = x_i + \frac{1}{2} (v_i + v_f) \Delta t$  » introduite 8 fois dans les séances 9, 10, 11, 12 et 14 ; de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et la position (VAP) est :  $v_f^2 = v_i^2 + 2a(x_f - x_i) = v_i^2 + 2a(\Delta x)$  » introduite 7 fois dans les séances 10, 11, 12 et 14 ; et de la facette MRUA-ALGÈBRIQUE « Dans un MRUA, la formule mettant en relation la vitesse, l'accélération et le temps (VAT) est :  $v_f = v_i + a \Delta t$  » introduite 11 fois dans les séances 9, 10, 11, 12 et 14.

Pour les facettes graphiques, il s'agit de la facette MRUA-GRAPHIQUE « Le graphique position-temps d'un mobile en MRUA est une parabole » introduite 9 fois dans les séances 3, 5, 6, 7, 9, et 13 ; de la facette MRUA-GRAPHIQUE « Le graphique position-temps d'un mobile en MRUA qui augmente sa vitesse dans le sens de référence est une demi-parabole verticale croissante » introduite 5 fois dans les séances 3, 11, 12 et 13 ; de la facette MRUA-GRAPHIQUE « Le graphique distance-temps d'un mobile en MOUVEMENT SUR UN PLAN INCLINÉ DESCENDANT SANS PROPULSION INITIALE une demi-parabole verticale croissante » introduite 5 fois dans les séances 11, 12 et 13 ; de la facette MRUA-GRAPHIQUE « Le graphique vitesse-temps d'un mobile

en MRUA est droite oblique » introduite 10 fois dans les séances 3, 5, 6, 9 et 13 ; de la facette MRUA-GRAPHIQUE « Le graphique vitesse-temps d'un mobile en MRUA qui augmente sa vitesse dans le sens de référence est une droite oblique de pente positive » introduite 5 fois dans les séances 10, 11 et 12. Enfin, pour la facette procédurale, la facette MRUA-PROCÉDURALE « Calcul de l'accélération sur un plan incliné » est introduite 6 fois dans les séances 7, 11, 12 et 13.

L'exemple suivant illustre quelques facettes du groupe de facettes MRUA en mettant en relation les tâches épistémiques qui les portent. Dans l'épisode 220 de la séance 13, l'équipe d'élèves du laboratoire F-Mouvement sur des plans inclinés descendants sans propulsion avec influence du milieu (air/eau) présente leur laboratoire dans la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation. Ils décrivent dans un premier temps les tracés des graphiques distance-temps dans chacun des milieux par une parabole pour le milieu « air » et une droite oblique pour le milieu « eau ». Dans un second temps, ils décrivent les tracés des graphiques vitesse-temps dans chacun des milieux par une droite oblique pour le milieu « air » et une droite horizontale pour le milieu « eau ». Ils expliquent le tracé du graphique vitesse-temps de la bille en mouvement dans l'air par une droite oblique en raison de sa variation de vitesse qui est constante dans l'air et le tracé du graphique vitesse-temps de la bille en mouvement dans l'eau par une droite horizontale en raison de l'atteinte d'une vitesse maximale de la bille dans ce milieu. Dans un troisième temps, les élèves décrivent les tracés des graphiques accélération-temps dans chacun des milieux par une droite horizontale positive pour le milieu « air » et une droite horizontale nulle pour le milieu « eau » (**figure 132**). Ils comparent les tracés de ces graphiques obtenus expérimentalement avec les tracés théoriques et évaluent positivement les tracés obtenus en raison du faible écart avec la théorie. Plus particulièrement, ils comparent la valeur de l'accélération expérimentale ( $2,5 \text{ m/s}^2$ ) avec la valeur de l'accélération théorique ( $3,03 \text{ m/s}^2$ ) obtenue par une formule mathématique et évaluent positivement l'accélération expérimentale obtenue en raison du faible écart avec l'accélération théorique. Dès lors, un élève de la classe sollicite l'équipe d'élèves à évaluer un argument (« Mais l'accélération sur un plan incliné n'est pas égale à  $9,8 \text{ m/s}^2$  »), argument qui est évalué négativement par l'équipe et qui conduit les élèves de l'équipe à expliquer la procédure pour calculer la valeur de l'accélération théorique sur un plan incliné au moyen de la formule mathématique  $a = 9,8 \sin \theta$ , avec  $\theta$  : angle du plan incliné. La formule étant évaluée positivement par l'enseignant, les élèves effectuent alors une opération formelle simple sur cette formule avec

l'angle  $\theta$  du plan incliné égale à  $18^\circ$ , ce qui conduit à la valeur théorique de l'accélération énoncée préalablement.

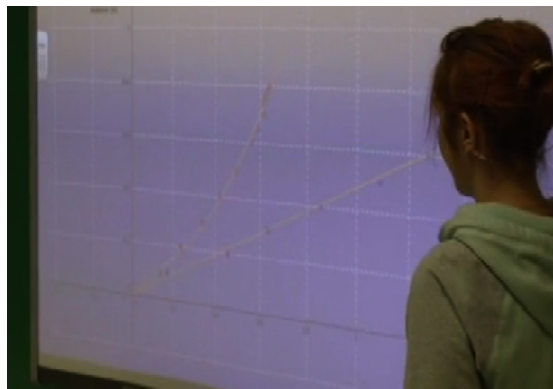


Figure 132- Description et comparaison du tracé du graphique distance-temps dans les milieux air et eau par les élèves du laboratoire F (séance 13, ens. 2)

### 7.3.3.3 Groupe de facettes *MOUVEMENT BALISTIQUE*

Comme c'est le cas du groupe de facette MRUA, le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE est également un groupe de facettes très riche quant à la grande diversité des facettes qui le composent. Il est constitué de 49 facettes dont 20 conceptuelles, 9 symboliques-algébriques, 16 symboliques-graphiques, 2 procédurales et 2 symboliques-vectorielles, et ce, avec une fréquence d'apparition totale de 158 facettes pour l'ensemble des séances ([annexe 20, tableau 13](#)). Il importe de souligner que ce groupe de facettes a été construit essentiellement au sein d'un seul laboratoire, par une seule équipe de travail.

Si les facettes MOUVEMENT BALISTIQUE sont introduites dans environ la moitié des séances, leur fréquence est négligeable dans les séances autres que la séance 14 où dans cette dernière la fréquence est de 142 facettes ([figure 133](#)). Les facettes de ce groupe sont essentiellement introduites dans le thème 4-Mouvement balistique (N=158), ce qui indique que la cohérence thématique est très bien assurée. Seulement 3 facettes de ce groupe sont introduites dans le thème 4-MRUA ([figure 134](#)).

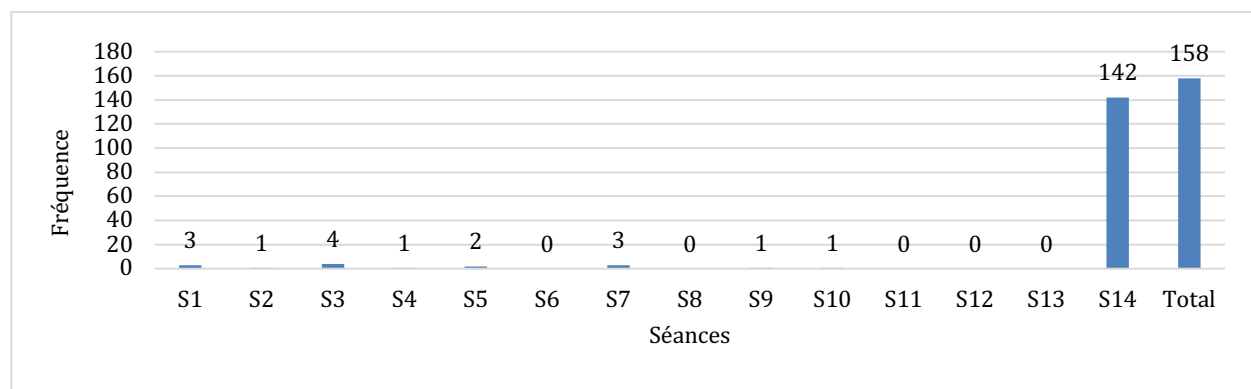


Figure 133- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les séances chez l'enseignant 2

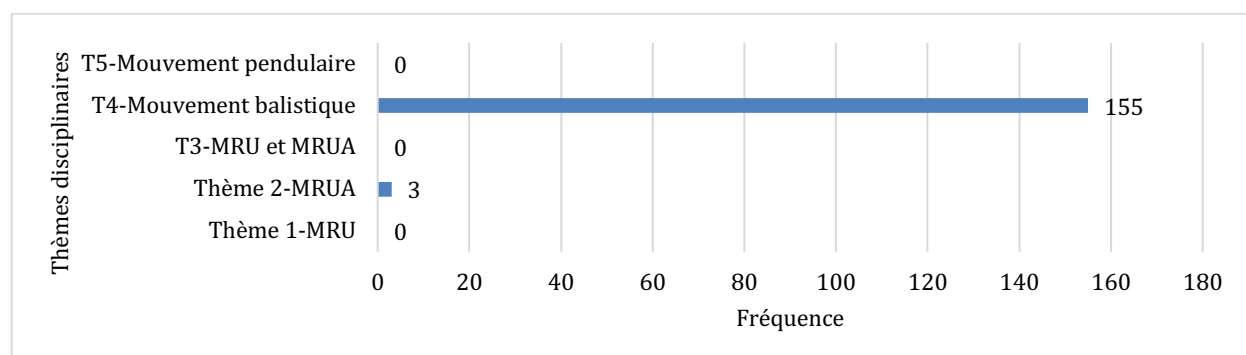


Figure 134- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

La densité des facettes Mouvement balistique varie aux deux extrêmes : elle est très faible dans toutes les séances (avec une variation entre 0 et 3,3) et très forte dans la séance 14 avec une densité extrêmement élevée de 120 (**tableau 59**). Quant à la densité thématique, elle varie de même selon deux dipôles : elle est très faible pour les thèmes 1, 2, 3 et 5 ( $D=0$  ; 0,34 ; 0 ; 0) et très forte pour le thème 5-Mouvement balistique avec une densité très élevée de 65,1. Globalement, la densité moyenne des facettes Mouvement balistique est de 10,3 au niveau de la séquence (**tableau 60**).

Tableau 59 : Densité des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les séances chez l'enseignant 2

S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	DM
2.3	0.9	3.3	0.8	1.6	0	2.7	0	0.8	0.9	0	0	0	120	10.3



Tableau 60 : Densité des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Thème 1-MRU	Thème 2-MRUA	T3-MRU et MRUA	T4-Mouvement balistique	T5-Mouvement pendulaire	Densité moyenne
0	0.34	0	65.1	0	10.3

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les facettes MOUVEMENT BALISTIQUE se déploient essentiellement dans les laboratoires (133 facettes dont 158 avec 4 facettes pour les explications spécifiques, 12 facettes pour la réalisation et 117 facettes pour la présentation) et, dans une moindre proportion, dans des moments d'exercisation (25 facettes sur 320) (**figure 135**).

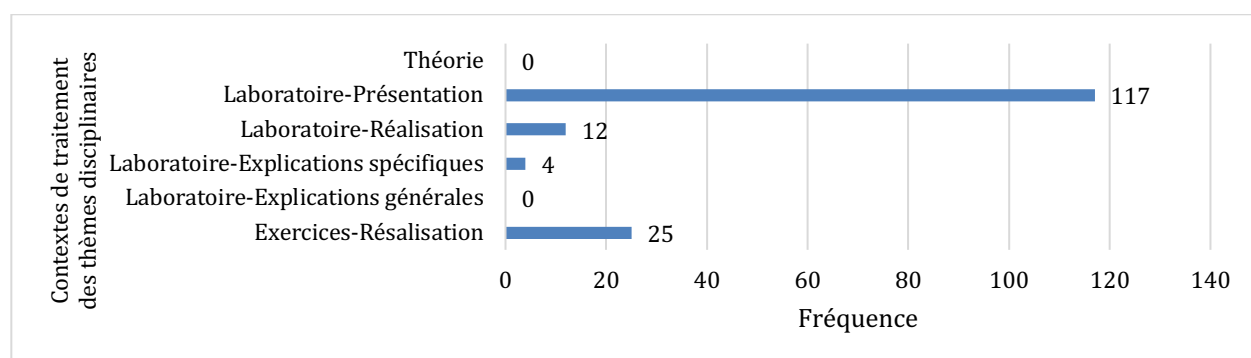


Figure 135- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires chez l'enseignant 2

Les facettes MOUVEMENT BALISTIQUE sont essentiellement introduites, dans une proportion similaire, à travers des situations expérimentales (44 facettes sur 158), des situations fictives (44 facettes sur 158) ou en s'appuyant sur des ressources didactiques (45 facettes sur 158). Dans une proportion moindre, elles sont déployées de manière décontextualisée (22 facettes sur 158) ou dans le cadre de démonstrations expérimentales (3 facettes sur 158) (**figure 136**). Elles émergent toutes de la démarche de modélisation des phases *Problématiser* (3 facettes sur 158), *Investiguer* (12 facettes sur 158) et *Conceptualiser et déployer* (143 facettes sur 158) (**figure 137**).

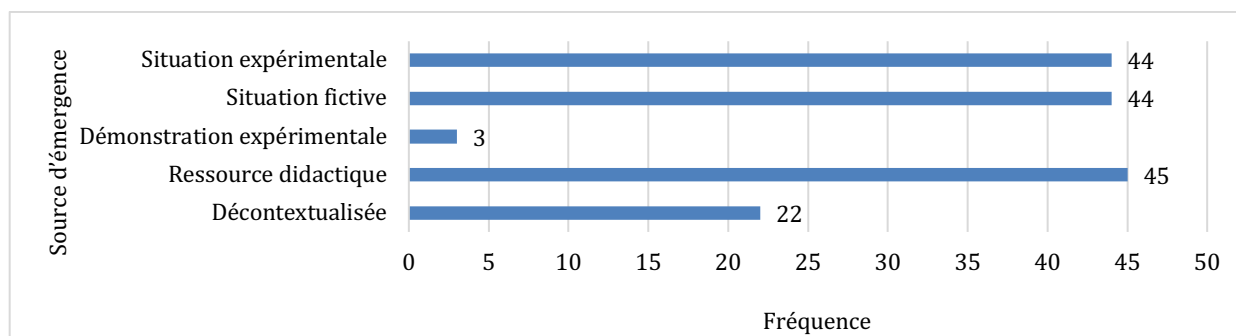


Figure 136- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon leurs sources d'émergence chez l'enseignant 2

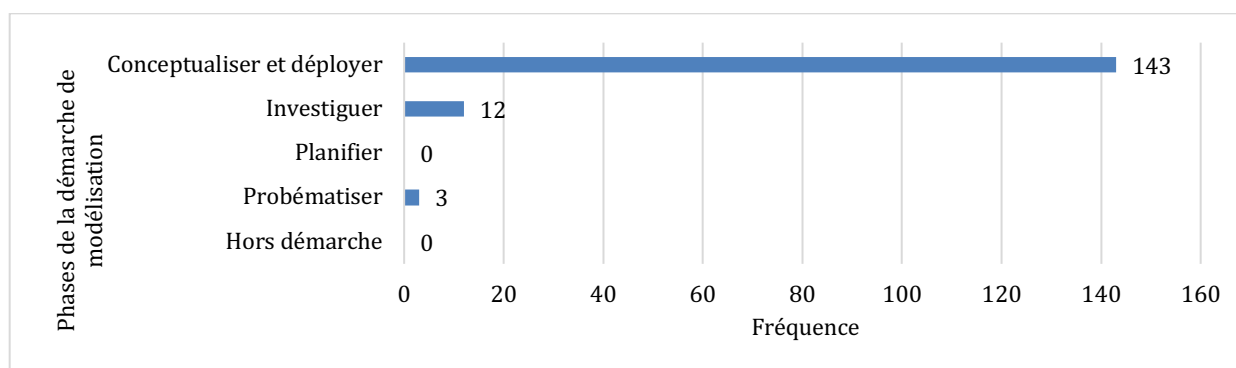


Figure 137- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon les phases de la démarche de modélisation chez l'enseignant 2

Les types de facette MOUVEMENT BALISTIQUE les plus fréquemment introduits dans la séquence sont les facettes MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLES (85 facettes sur 158), suivis dans une proportion égale, des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE-GRAPHIQUES (33 facettes sur 158) et des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE-ALGÈBRIQUES (32 facettes sur 158). De plus, quelques facettes MOUVEMENT BALISTIQUE-PROCÉDURALES (2 facettes sur 158) et MOUVEMENT BALISTIQUE-VECTORIELLES (6 facettes sur 158) ont été recensées (figure 138).

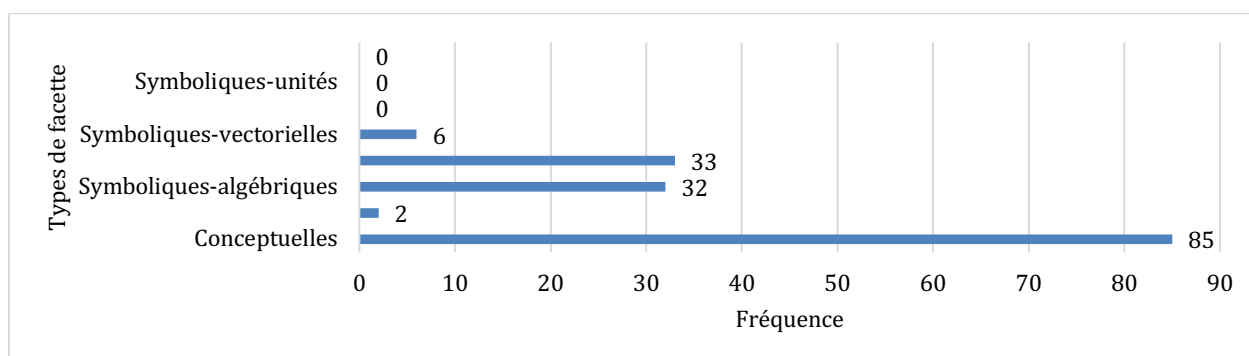


Figure 138- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon leurs types chez l'enseignant 2

Les facettes MOUVEMENT BALISTIQUE sont essentiellement prises en charge par les élèves seuls (113 facettes sur 158). Dans une moindre proportion, elles sont prises en charge par l'enseignant seul (28 facettes sur 158) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (17 facettes sur 158) (**figure 139**).

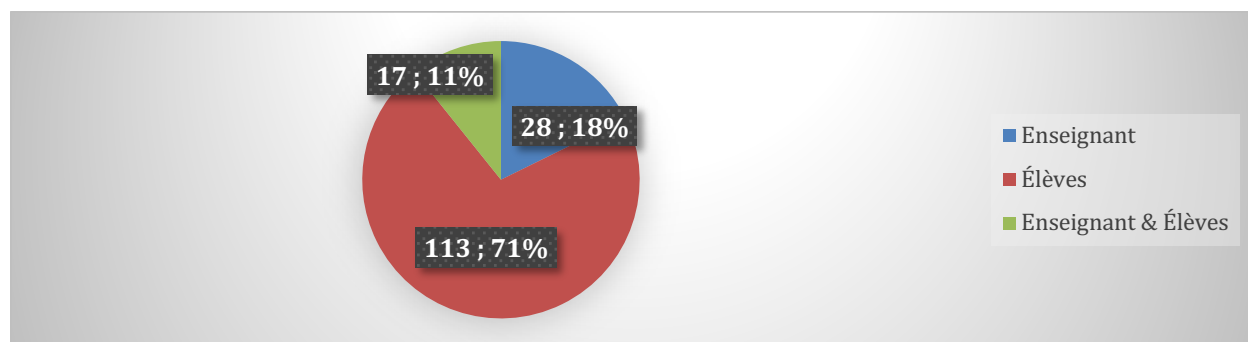


Figure 139- Distribution des facettes MOUVEMENT BALISTIQUE selon la responsabilité des acteurs chez l'enseignant 2

Parmi les 49 facettes MOUVEMENT BALISTIQUE, 41 ont une continuité très faible et seulement 8 se démarquent de ces dernières avec 6 ayant une continuité faible et 2 ayant une continuité moyenne. Ces facettes, pour la plupart conceptuelles, portent sur le sens du mouvement balistique, la grandeur de la vitesse et de l'accélération dans ce mouvement, la portée maximale d'un projectile, ainsi que sur la position verticale d'un projectile en fonction du temps.

Pour les facettes conceptuelles, il s'agit de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Le mouvement balistique est un mouvement composé d'un mouvement vertical et d'un mouvement horizontal » introduite 12 fois dans les séances 1, 4, 10 et 14 ; de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement balistique, la vitesse horizontale est constante » introduite 11 fois dans la séance 14 ; de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement balistique, la vitesse verticale augmente dans le mouvement descendant » introduite 6 fois dans la séance 14 ; de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement balistique, la vitesse verticale devient nulle à un moment, à sa hauteur maximale » ; introduite 6 fois dans la séance 14, de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement balistique, la vitesse verticale diminue dans le mouvement ascendant » introduite 6 fois dans la séance 14 ; de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE « Dans un mouvement balistique, l'accélération verticale est de  $-9,8 \text{ m/s}^2$  » introduite 8 fois dans la séance 14 ; et de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-CONCEPTUELLE

« Dans un mouvement balistique, la portée d'un projectile est maximale lorsque son angle de tir est à 45 degrés » qui est introduite 7 fois dans les séances 3 et 14.

Pour la facette algébrique, il s'agit de la facette MOUVEMENT BALISTIQUE-ALGÈBRE  
 « Dans la composante verticale d'un mouvement balistique, la position finale verticale est donnée par la formule  $y_f = y_i + v_i \Delta t - \frac{1}{2} g \Delta t^2$  » introduite 6 fois dans la séance 14.

L'exemple suivant illustre quelques facettes du groupe de facettes MRUA en mettant en relation les tâches épistémiques qui les portent. Dans l'épisode 224 de la séance 14, l'équipe d'élèves du laboratoire G-Mouvement balistique présente leur laboratoire dans la phase de *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation. Ils définissent le mouvement balistique comme un mouvement composé d'un MRUA en  $y$  et d'un MRU en  $x$ . Ils identifient dans la page du manuel scolaire *Quantum* les graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps du mouvement balistique selon les composantes verticale et horizontale du mouvement. Dans un premier temps, ils décrivent les tracés de chacun de ces graphiques, en commençant par la composante horizontale du mouvement : une droite oblique pour le graphique distance-temps, une droite horizontale pour le graphique vitesse-temps et une droite horizontale nulle pour le graphique accélération-temps. Par la suite, ils définissent le mouvement balistique comme étant un mouvement dont le projectile peut être lancé horizontalement ou obliquement, et exemplifient un mouvement balistique horizontal par une balle lancée horizontalement du haut d'un édifice avec une force initiale et un angle de tir de départ nul. Ensuite, ils définissent le mouvement balistique comme un mouvement se décomposant sur les axes  $x$  et  $y$  du plan cartésien, et ce de manière à comparer par la suite les tracés des graphiques selon la composante verticale avec les tracés des graphiques selon la composante horizontale. À l'aide d'une photo prise par un stroboscope, ils décrivent le tracé du graphique position-temps d'une balle suivant un mouvement balistique (une parabole) la variation de la vitesse en  $x$  (elle est nulle) et la variation de la vitesse en  $y$  (elle est régulière et augmente de 9,8 m/s chaque seconde) de cette balle. Ils expliquent que la vitesse de la balle en  $x$  est constante, car pour un même écart de temps, la distance parcourue par la balle est la même. Puis, ils décrivent et comparent la variation de la position en  $y$  entre une balle en chute libre et une balle suivant un mouvement balistique (projetée horizontalement) : les balles parcourent toujours les mêmes distances en  $y$  pour un même intervalle de temps (**figure 140**).

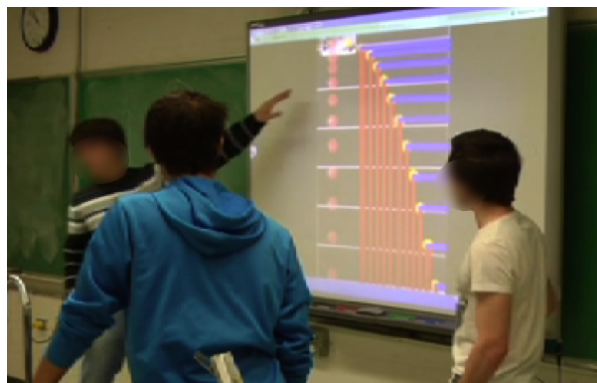


Figure 140- Description et comparaison de la variation de la position  $y$  entre une balle en chute libre et une balle suivant un mouvement balistique par les élèves du laboratoire G (séance 14, ens. 2)

Ces descriptions et comparaisons conduisent les élèves à déduire que le mouvement balistique est un mouvement composé d'un MRU et d'un MRUA et que la composante horizontale du vecteur vitesse est constante alors que la composante verticale du vecteur vitesse varie de façon régulière au cours du temps (**figure 141**).

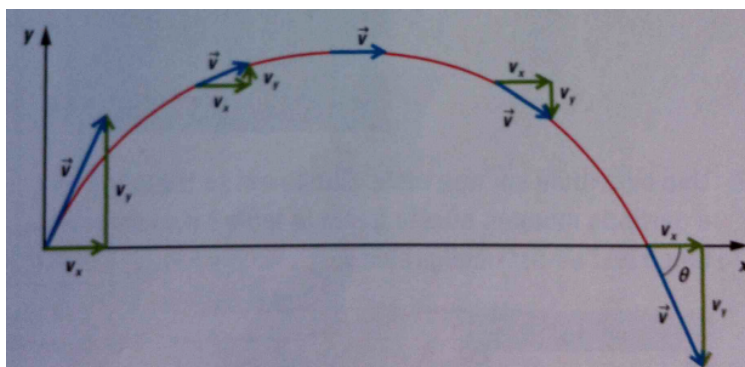


Figure 141- Composantes verticale et horizontale du vecteur vitesse dans un mouvement balistique déduites par les élèves du laboratoire G (séance 14, ens. 2)

#### 7.3.4 Synthèse de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2 sous l'angle des facettes de savoir

*Dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, le savoir n'est pas uniquement introduit sous la forme de définitions formelles énoncées par l'enseignant, mais plutôt sous la forme de facettes de savoir (petits éléments de savoirs) formulées dans le langage des acteurs de la classe à travers diverses tâches épistémiques. Au total, 745 facettes de savoir sont introduites dans les 14 séances.*

*Dans cette séquence, la distribution des groupes de facettes associées aux concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire se fait de manière relativement continue sur l'ensemble des séances, avec toutefois une plus grande introduction dans la seconde moitié de la séquence, dans les séances à 7 à 14, qui couvrent les phases Conceptualiser et Déployer de la démarche de modélisation lors de la présentation des laboratoires.*

*La progression du savoir sur le plan thématique met en évidence une variabilité importante d'introduction des facettes selon les thèmes disciplinaires abordés. Les groupes de facettes MRU, MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE prédominent largement sur les autres groupes de facettes quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence. Par ailleurs, nous relevons que les groupes de facettes se distribuent dans des proportions variables selon les thèmes disciplinaires retenus par l'enseignante et que certains thèmes disciplinaires mobilisent davantage des groupes de facettes particuliers : le thème 1-MRU mobilise essentiellement le groupe de facettes VITESSE ; le thème 2-MRUA mobilise essentiellement le groupe de facettes MRUA ; le thème 3-MRU et MRUA mobilise essentiellement les groupes de facettes MRU et MRUA et le thème 4-MB mobilise essentiellement le groupe de facettes MB. Ceci indique une cohérence conceptuelle importante dans l'introduction des facettes de savoir en relation avec les thèmes disciplinaires retenus.*

*Il apparaît que la densité des groupes de facettes de cette séquence, c'est-à-dire le nombre de facettes introduites d'un même groupe par heure dans une séance (tous thèmes confondus) diffère grandement selon les séances considérées. Dans la seconde moitié des séances, les séances 7 et 8 sont très denses pour le groupe de facettes MRU ; les séances 9, 10, 11 et 12 sont très denses pour les groupes de facettes MRUA et la séance 10 est très dense pour le groupe de facettes MB avec une densité exceptionnelle de 120 facettes à l'heure.*

*Notre analyse de la densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires met en évidence une grande variabilité de la densité de ces groupes de facettes : les groupes de facettes Vitesse et MRU sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1-MRU ; le groupe de facettes MRUA est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 2-MRUA ; les groupes de facettes MRU et MRUA sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3-MRUA et MRUA ; et le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 4-Mouvement balistique. Au niveau de cette séquence (tous thèmes disciplinaires confondus), un seul groupe de facettes, le groupe de facettes MRUA, se démarque nettement des autres quant à sa plus grande densité moyenne. Nous postulons que cette régularité dans l'introduction des éléments de savoir pourrait favoriser les apprentissages conceptuels chez les élèves.*

*Sur le plan du contexte de traitement des thèmes disciplinaires, tous les groupes de facettes de savoir sont introduits dans la présentation ou la réalisation ou des laboratoires, et plus particulièrement dans ce dernier contexte sauf pour le groupe de facettes Accélération dont les facettes font l'objet d'une introduction plus importante dans les moments de réalisation du laboratoire. Contrairement à la séquence d'enseignement 1, dans cette séquence, la fréquence d'apparition des facettes de savoir est beaucoup plus faible dans les moments de théorisation menés par l'enseignant. Ceci indique que l'enseignant 2 accorde une priorité aux laboratoires*

*pour la construction des facettes de savoir en jeu dans la modélisation et la compréhension des phénomènes du monde matériel. Ainsi, la construction des faits scientifiques se fait en s'appuyant sur le recueil et l'analyse de données empiriques.*

*Sur le plan de la source d'émergence des facettes de savoir, nous observons une variabilité importante de cet indicateur selon les groupes de facettes. Dans cette séquence, les facettes du groupe VITESSE sont celles qui émergent le plus souvent de manière décontextualisée ; les facettes du groupe Distance parcourues sont celles qui émergent le plus souvent de situations fictives ; les facettes du groupe Mouvement balistique sont celles qui émergent le plus souvent de ressources didactiques et les facettes des groupes ACCÉLÉRATION, MRU et MRUA sont celles qui émergent le plus souvent de situations expérimentales. Comparativement à la séquence 1, cette séquence donne davantage l'occasion aux élèves de construire des faits à partir de données observables, recueillies et analysées par les élèves eux-mêmes.*

*Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, les groupes de facettes sont principalement introduits dans le cadre d'une démarche de modélisation, et plus particulièrement dans la phase Conceptualiser et déployer. Seules quelques facettes des groupes MRUA et Mouvement balistique sont introduites dans la phase de problématisation de cette démarche.*

*Quant aux types de facettes de savoir en jeu, nous relevons une prédominance des facettes de savoir conceptuelles dans la plupart des groupes de facettes. Deux autres types de facettes, les facettes SYMBOLIQUES-ALGÈBRIQUES et les facettes SYMBOLIQUES-GRAPHIQUES, présentent également une fréquence d'apparition très importante. Dans cette séquence, le savoir n'est donc pas seulement d'ordre conceptuel, puisqu'il mobilise d'autres registres de représentation sémiotique, ce qui favoriserait les apprentissages, à condition que ces registres soient mis en relation de manière adéquate.*

*Enfin, la prise en charge des facettes de savoir, contrairement à la séquence d'enseignement 1, est largement du côté des élèves ou elle est partagée entre l'enseignant et les élèves, et ce, pour tous les groupes de facettes. Ceci indique que dans cette classe, les savoirs en jeu dans les processus de modélisation émergent davantage d'un dispositif d'enseignement-apprentissage s'inscrivant dans une logique constructiviste, voire socioconstructiviste.*

## **8. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ L'ENSEIGNANT 2**

Concernant les principaux défis et difficultés associés à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves, l'enseignant 2 en déclare une douzaine (**tableau 61**). Parmi les plus fréquemment cités figurent la complexité des modèles sous-jacents aux phénomènes physiques à l'étude (N=7), l'établissement de liens intradisciplinaires ou interdisciplinaires (N=9), la construction ou l'analyse de registres de représentation (tabulaires, algébriques, graphiques,

vectoriels, etc.) (N=6) et la présentation des laboratoires à la classe (N=5). Soulignons que si nous avons observé directement dans les séances certains défis et difficultés rapportés par cet enseignant (l'établissement de liens intradisciplinaires ou interdisciplinaires ; la construction ou l'analyse de registres de représentation : tabulaires, algébriques, graphiques, vectoriels, etc. ; l'utilisation du matériel de laboratoire), d'autres défis et difficultés que nous avons observés n'ont pas été déclarés par l'enseignant 2 lors des entrevues pré et postenregistrement. Il s'agit plus particulièrement des modalités de recueil des données, de la compréhension de savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, théories, etc.) ou du langage scientifique (symbolisme).

La complexité des modèles sous-jacents aux phénomènes physiques à l'étude figure parmi les principaux défis et difficultés du côté des élèves (N=7). En réalité, chacun des laboratoires proposés aux élèves a sa complexité qui lui est propre comme souligne l'enseignant 2. À ce sujet, il cite l'exemple du laboratoire A sur la chute libre qui à première vue semble simpliste, mais qui nécessite toutefois une maîtrise des conditions expérimentales dans le calcul du module de l'accélération. Il cite l'exemple des laboratoires D, E et F impliquant des mouvements d'objets matériels sur des plans inclinés qui nécessitent la construction de systèmes de forces impliquant des représentations vectorielles, et plus particulièrement du laboratoire F sur les plans inclinés descendants sans propulsion initiale avec influence du milieu qui en plus nécessite le recours à des concepts complexes comme la poussée d'Archimède. Enfin, le laboratoire G sur le mouvement balistique est celui qui déstabilise le plus les élèves sur le plan de sa modélisation, car il est composé d'un MRU et d'un MRUA.

L'identification et la reconnaissance de facteurs expérimentaux pouvant avoir une influence ou non sur le phénomène (N=3) pose également problème. D'une part, parce que les élèves ont de la difficulté à identifier des facteurs expérimentaux pertinents (ex. : facteurs peu plausibles ou difficilement contrôlables comme la température) en lien avec le phénomène qu'ils doivent explorer et, d'autre part, parce qu'ils ont de la difficulté à reconnaître que certains facteurs expérimentaux n'ont parfois aucune influence sur leur phénomène. En outre, l'acceptabilité d'un écart entre le résultat expérimental et le résultat théorique attendu est parfois difficilement envisageable par les élèves. Plutôt que de formuler des hypothèses possibles et d'interroger les conditions d'expérimentation, le réflexe est de mettre en doute la validité des résultats expérimentaux obtenus. Or, la reconnaissance du facteur expérimental exploré et de ses effets réels



ne peut être pleinement réalisée si les élèves sont dans le « paradigme de la bonne réponse » plutôt que dans le paradigme scientifique.

Un autre défi ou difficulté soulevé par l'enseignant 2 est l'absence de rigueur dans la manipulation des variables expérimentales (N=2). Au moment d'explorer les effets d'un facteur expérimental, les élèves ont souvent tendance à faire varier plus d'un facteur à la fois. L'enseignant cite par exemple le cas du laboratoire A sur la chute libre où les élèves font varier à la fois la masse et le volume de la bille d'acier en chute libre. Ces erreurs qui se trouvent à l'origine de la conception du protocole expérimental nécessitent des interventions de la part de l'enseignant qui revient sur le concept de variable.

La bonne mise en œuvre des laboratoires nécessite l'établissement de liens intradisciplinaires (dans le champ de la physique) ou interdisciplinaires (avec d'autres disciplines scolaires) (N=9). De manière générale, l'enseignant 2 rapporte que les élèves ont tendance à voir les disciplines scolaires de manière isolée et ont beaucoup de difficulté à appliquer ou transférer des apprentissages réalisés dans une autre discipline. L'établissement de liens interdisciplinaires entre la physique et les mathématiques est particulièrement essentiel pour la modélisation mathématique des phénomènes. Ces liens peuvent être simples, par exemple faire appel à la trigonométrie pour déterminer l'angle d'inclinaison d'un plan incliné, ou plus complexes, comme construire le nuage de points d'une série de données expérimentales, et déterminer par régression la fonction mathématique qui lui est associée. Dans le cas du laboratoire F sur les plans inclinés descendants sans propulsion initiale avec influence du milieu, les élèves doivent faire appel au concept de densité en chimie afin d'expliquer le comportement de la bille d'acier dans l'eau.

La mise en relation entre le monde expérimental et le monde théorique (N=4), ce que l'enseignant 2 désigne par une transition entre ces deux mondes est difficile pour les élèves. Cette mise en relation qui est nécessaire autant pour expliquer un phénomène « en mettant des mots dessus » que pour évaluer les résultats expérimentaux obtenus à la lumière de résultats théoriques ne va pas de soi.

La construction et l'analyse des représentations tabulaires, algébriques, graphiques et vectorielles figurent parmi les principales difficultés liées à l'apprentissage des modèles et de la

démarche de modélisation (N=6). Ces défis et difficultés se situent sur deux plans. La construction de représentations graphiques issues de données expérimentales (nuages de points) pose des difficultés au moment où les intervalles de temps en jeu sont fractionnaires, par exemple la prise en considération de mesures de temps aux soixantièmes de seconde alors que les élèves ont l'habitude de construire des graphiques avec des intervalles de temps dont les nombres sont entiers. L'enseignant pointe du doigt les faiblesses des élèves au niveau de ce qu'il appelle « la théorie des graphiques » concernant les passages entre diverses représentations graphiques du mouvement. Si les passages entre les graphiques distance-temps et vitesse-temps ou entre les graphiques vitesse-temps et accélération-temps au moyen du calcul du taux de variation s'avèrent assez faciles pour les élèves, en revanche, les passages inverses entre les graphiques vitesse-temps et distance-temps et entre les graphiques accélération-temps et vitesse-temps au moyen du calcul de la notion d'aire sous la courbe posent beaucoup plus de défis.

L'engagement dans une démarche de modélisation ouverte (N=2) n'est pas simple pour les élèves en raison des nombreux choix auxquels ils doivent faire face. Dans la sélection et la manipulation des facteurs expérimentaux optionnels à explorer, les élèves doivent assumer les choix effectués et les résultats obtenus au moyen de manipulations qui n'ont pas été menées nécessairement de manière rigoureuse. Cette démarche de modélisation ouverte déstabilise les élèves au début de la démarche, mais au fur et à mesure qu'ils progressent, ils se sentent de plus en plus rassurés.

Comme nous l'avons souligné précédemment, tous les laboratoires engagent les élèves dans un recueil de données au moyen de sondes photoélectriques. Au début de la démarche de modélisation, notamment au premier cours, l'utilisation de ce nouveau matériel de laboratoire pose des défis importants aux élèves (N=3), mais ceux-ci s'estompent rapidement dès le deuxième cours.

Un autre problème est celui de l'accessibilité au savoir théorique de référence dans diverses ressources (N=3). À ce sujet, l'enseignant 2 souligne plus particulièrement que les ressources proposées sur le Web ne sont pas toujours en relation avec le phénomène que les élèves explorent, sont souvent de haut niveau et sont rarement adaptées aux élèves.

Si la faible accessibilité au savoir théorique de référence sur le Web pose problème aux élèves, à cela s'ajoute la difficulté d'exploiter judicieusement les ressources théoriques consultées (N=2). Plus précisément, c'est la sélection des informations pertinentes et la capacité des élèves à résumer et vulgariser les contenus trouvés sur ces sites WEB qui posent problème.

Au terme de leur laboratoire, les élèves sont appelés à présenter différents aspects de leur laboratoire (N=5). Or, cette présentation pose de nombreux défis, car contrairement à des exposés en français, en physique, ils sont appelés à développer des contenus sur le plan conceptuel, et à trouver des stratégies de modélisation permettant de favoriser la compréhension de ces contenus auprès de leurs pairs. L'enseignant demande donc aux élèves de planifier l'enseignement d'un cours de physique visant à développer des contenus disciplinaires à faire apprendre à la classe. Pour l'enseignant, c'est en enseignant que les élèves ont la possibilité d'approfondir leur compréhension des concepts.

Enfin, le dernier défi du côté des élèves rapporté par l'enseignant 2 est les temps à disposition pour la réalisation des laboratoires (N=1). Si au début des laboratoires les élèves pensaient avoir suffisamment ou même trop de temps pour la réalisation du laboratoire, au fur et à mesure qu'ils progressent dans celui-ci, ils se rendent compte que la charge de travail est plus conséquente que prévu, et cela engendre des réajustements nécessaires, notamment en vue de la préparation à la présentation de leur laboratoire.

Outre les défis et difficultés déclarés par l'enseignant 2, notre observation des pratiques d'enseignement sur les enregistrements vidéos nous a permis d'en ajouter d'autres, plus particulièrement la compréhension des savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, théories, etc.) chez certains élèves de la classe (N=8). Cette difficulté rapportée cependant par l'enseignante 1 dans les entrevues pré et postenregistrement n'a jamais été pointée par l'enseignant 2 dans la pratique déclarée.

Tableau 61 : Défis et difficultés associées à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2

Du côté des élèves, les principaux défis et difficultés associés à l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...
<b>1. la complexité des modèles sous-jacents aux phénomènes physiques à l'étude (N=7)</b>
<p>P : Oui c'est un gros défi celui-là. Ils ont tous leur complexité quelque part. L'équipe de chute libre à chaque fois ils disent ah chute libre ah oui c'est facile facile. Ils n'arrivent pas, ils n'arriveront jamais à 9.8. Allez le refaire. Ça ne marche pas. Allez le refaire. Ils vont l'essayer, ils vont l'essayer, ils n'arriveront jamais ce qui fait que là il faut qu'ils sortent du cadre. C'est quoi la chute libre à 9.8 selon la théorie ? S'ils ne la comprennent pas la foutue théorie ne s'applique pas ça dans un local de classe à 2 mètres de hauteur, comprends-tu ? Mais il faut qu'ils le fassent ce lien-là donc chacun a leur difficulté, mais pas à la même place. (Ent pré 3, ens 2)</p> <p>P : Sur le plan incliné, ce sont les défis des forces, les calculs de forces ils vont s'arracher les cheveux avec ça. Lorsqu'ils vont arriver avec les propulsions et tout là, les forces sur les plans inclinés il faut vraiment qu'ils travaillent leurs systèmes de forces (...) On a travaillé les systèmes de forces, mais on les a travaillés à l'équilibre là il n'est plus en équilibre ce qui fait que là comment on fait si ce n'est pas en équilibre ? Oups petite démarche en mathématiques encore là supplémentaire nouveau modèle qui va apparaître. Là on rentre en dynamique et à ce moment-là il va aller chercher ces liens-là. (Ent pré 3, ens 2)</p> <p>P : L'équipe qui est sur la balistique eux autres au niveau théorique ils ont un gros lien à faire (...) Eux autres sont en mouvements composés donc pour eux autres c'est sûr que l'appropriation est un petit peu plus difficile et les modèles de MRU, MRUA bien il faut quasiment qu'ils les comprennent avant de rentrer dans leur propre mouvement. (Ent pré 3, ens 2)</p>
<b>2. l'identification et la reconnaissance de facteurs expérimentaux pouvant avoir une influence ou non sur le phénomène (N=3)</b>
<p>P : C'est sûr que certains élèves se rendent compte avec la prise de données, avec une certaine recherche théorique qu'ils ne sont pas capables de valider leurs résultats. Ça fait que là déjà je vous dirais dans un, deux, trois labs il y a des manipulations qui ont été refaites (...) C'est drôle parce qu'il y en a qui font (...) des tests et ils se rendent compte que le paramètre n'influence pas le mouvement, ce qui fait que pour eux autres c'est un échec, ce qui fait que là il faut trouver d'autre chose (...) Ils ont de la difficulté à voir le fait qu'on pense à quelque chose qui peut influencer un mouvement que nécessairement ça va avoir un impact réel dans les conditions de lab dans lesquelles ils le font. Ils se rendent compte que bien finalement ça ne change rien puis là pour eux autres c'est un échec monumental. Donc, être capable de dire que ce constat-là de dire que le facteur n'a aucun effet, il ne vient pas à leur esprit (...) En balistique ils disent on n'arrive pas du tout. On calcule, je fais le calcul de ma portée expérimentale, ma portée théorique et j'ai un écart de 1 pour 2. Ils disent : on s'est planté littéralement. Peut-être. Essayons de sortir les idées les hypothèses, qu'est-ce qu'il y a derrière ça ? Est-ce que c'est normal ? Est-ce que ça pourrait éventuellement être normal dans les conditions que tu travailles ? C'est ça. Donc ils ont la crainte de ne pas avoir le résultat attendu. Ils ont tellement tellement tellement peur de ne pas avoir le résultat attendu et dieu sait que c'est ça en sciences alors c'est surtout cet aspect-là qu'il faut travailler beaucoup avec eux autres. (Ent post 4, ens 2)</p>
<b>3. la manipulation de variables expérimentales (N=2)</b>
<p>P : En gardant la vitesse constante et en gardant l'angle constant et ça c'est l'erreur dans les protocoles tu vas t'en rendre compte un moment donné dans les protocoles. Il y en a qui ont tendance à faire varier deux choses et ça, c'est une grosse erreur par exemple en chute libre. En chute libre c'est terrible parce que j'ai un système magnétique de départ donc système magnétique ça permet d'avoir la balle stable à une hauteur, mais évidemment moi je leur avais mis plusieurs types de balle en acier bien entendu ce qui fait que là bien on va travailler la variation de la masse, ce qui fait que là ils prenaient les différentes balles ils travaillaient la variation de la masse puis c'est parce que la balle n'est pas la même là tu changes le volume aussi là tu n'as pas le même format oh variation de volume, variation de masse lequel va avoir une influence ? Je ne le sais pas. Qu'est-ce que tu fais maintenant ? Je ne veux pas que le volume change, mais je veux que la masse change. Tu fais ça comment ? C'est ça que je veux voir apparaître. Je veux qu'ils se cassent la « cocologie ». C'est simple, c'est simple, mais il faut qu'ils pensent qu'ils le développent, il ne faut pas qu'ils tombent dans le panneau de faire</p>

**varier plusieurs choses en même temps.** Ça, c'est mortel, même chose en balistique, même chose pour tous les autres. **Ils ont tous cette même difficulté-là parce qu'ils ont une petite tendance à travailler plusieurs choses en même temps.** (Ent pré 3, ens 2)

#### 4. l'établissement de liens intradisciplinaires ou interdisciplinaires (N=9)

P : Bien la grosse faiblesse en sciences c'est que malheureusement les jeunes laissent les math en math, ils laissent le français en français, ils laissent l'histoire en histoire, puis ils laissent les sciences en sciences et ces liens-là ne se font pas. (...) Juste l'autre jour, **comment est-ce que je fais pour calculer mon plan incliné ?** J'ai dit débrouille-toi je ne veux pas de rapporteur d'angle. Tu ne me mets pas un rapporteur là-dessus là. Tu ne me mettras pas un plan qui a 2 m de long avec un rapporteur qui a 6 pouces. Tu ne me fais pas ça. Oh lien qu'est-ce qu'on fait ? Pensez-y. Vous avez tous fait ça. **Oh la trigonométrie** sort bon ils commencent à... C'est ça. C'est de favoriser ces liens-là. Actuellement au **moment où j'en suis c'est de travailler le maxima. Ils sont au niveau du graphique. Comment je le trace ?** La fameuse question. Comment je le trace ? C'est quoi ton nuage de points ? Reviens sur tes fonctions. Ça serait quoi la logique ? Toi je te demande de travailler le mouvement qui monte, mais logiquement ils se passent quoi après ? Hein la boule elle ne se désintègre pas dans les airs. Elle fait quoi après ? Ça serait quoi la suite du graphique que tu n'as pas mesuré ? **Ah bien oui c'est une parabole.** Faire des liens mathématiques c'est mon ouvrage pour les prochains cours (Ent pré 3, ens 2)

P : Les volets mathématiques oui il y a des défis là-dedans c'est clair alors **ils vont travailler avec toutes sortes de paraboles, ils vont travailler avec toutes sortes de fonctions qui sont souvent très à l'aise en math, mais incapables de transférer ailleurs.** En math, ils sont habitués dans leur beau livre de math. Ça arrive toujours bien, tous les beaux petits points, ça arrive c'est merveilleux. **Ici, bien ils ont des nuages de points et il faut qu'ils fassent ce lien-là entre le nuage de point. C'est ça la réalité. Ce sont des données expérimentales. Ce ne sont pas des données d'un livre alors ça c'est un défi pour eux autres.** Ils ont énormément de difficulté à faire ce lien-là parce qu'ils sont habitués de travailler des fonctions qui arrivent toutes parfaitement, mais ça, ce n'est pas ça alors ça il y a une grosse difficulté qui arrive au niveau graphique (Ent pré 3, ens 2)

P : (...) Quand on tombe dans les milieux composés, donc ceux avec balistique et ceux avec le milieu eux autres **il faut qu'ils fassent des liens avec d'autres concepts** (...) dans le cas par exemple du milieu dans l'eau, il faut sortir des objectifs de physique puis il faut aller chercher d'autres objectifs donc **le mouvement dans les fluides on ne le voit pas ce n'est absolument pas dans nos programmes** donc il faut qu'ils soient capables de faire ce lien-là. Il y a un **peu de chimie** au travers qui vont être capables de gérer à travers tout ça donc **les concepts de densité et tout** alors c'est d'être capable d'aller chercher ces liens extérieurs (...) Donc il faut que je les amène sur des pistes comme ça (...) parce que **pour eux autres ce ne sont pas des liens naturels qui vont se faire là. C'est clair clair clair qu'ils vont accrocher là-dedans** donc pour moi c'est d'aller chercher ces objectifs qui sont à l'extérieur de les ramener dans mon cours et de les intégrer dans notre réalité qu'eux ont vécue alors ça, c'est un gros défi au point de vue pédagogique (Ent pré 5, ens 2)

#### 5. la mise en relation entre le monde expérimental et le monde théorique (N=4)

P : Ils se questionnent, puis c'est le but aussi (...) Il y a différentes façons de la trouver les réponses [à une question] alors on y va comme ça, mais non c'est ça il va y avoir effectivement... **les points d'interrogation s'en viennent parce que la transition entre l'expérimental et le théorique quand c'est le temps d'arriver de dire bon là mets-moi des mots là-dessus.** Comment tu m'expliques ça ? Comment tu le dis ? (Ent pré 3, ens 2)

P : En balistique ils disent on n'arrive pas du tout. On calcule, **je fais le calcul de ma portée expérimentale, ma portée théorique et j'ai un écart de 1 pour 2. Ils disent : on s'est planté littéralement.** Peut-être. Essayons de sortir les idées les hypothèses, qu'est-ce qu'il y a derrière ça ? Est-ce que c'est normal ? Est-ce que ça pourrait éventuellement être normal dans les conditions que tu travailles ? C'est ça. Donc **ils ont la crainte de ne pas avoir le résultat attendu. Ils ont tellement tellement tellement peur de ne pas avoir le résultat attendu** et dieu sait que c'est ça en sciences alors c'est surtout cet aspect-là qu'il faut travailler beaucoup avec eux autres. (Ent post 4, ens 2)

#### 6. la construction ou l'analyse de registres de représentation : tabulaires, algébriques, graphiques, vectoriels, etc. (N=6)

P : Puis la 3<sup>e</sup> affaire en math on travaille toujours des variables (...) souvent faciles à utiliser dans ce sens l'abscisse ils vont faire une fonction en fonction du temps : une minute, deux minutes, trois minutes, quatre minutes, cinq minutes, six minutes. Oui ça se travaille bien sur un axe. Moi ils sont au 60<sup>e</sup> de seconde. Ils prennent des données aux soixantièmes de seconde. J'ai des ordinateurs qui mesurent aux millièmes de

seconde. Ils ont des données aux millièmes et aux soixantièmes de seconde. **Ils ne comprennent pas comment on met ça sur un graphique, comment construire un graphique avec une échelle fractionnaire.** Parce que quand tu fais ton échelle sur x là, **tu n'as pas 10 minutes là-dessus là, tu as 10 soixantièmes de seconde sur ton échelle**, ce qui fait que qu'est-ce que tu viens de faire avec tes données là ? **Tu viens les zoomer alors la moindre erreur ils regardent leurs points puis ils disent c'est une constellation cette affaire-là.** Ils ne sont pas habitués de zoomer, de voir une fonction agrandie puis là je leur dis remet ça, dézoom, vas-t'en dans l'autre sens, agrandis ton échelle de temps. (Ent post 6, ens 2)

P : Les liens oui, **ils font très très bien les liens entre les graphiques de distance et les graphiques d'accélération, mais le sens inverse très peu.** J'ai une équipe qui l'a abordé un moment donné qui l'a approché, **mais c'était un peu plus faible (...)** La théorie des graphiques c'est une façon de faire. C'est une porte de plus que je te donne pour que tu puisses y avoir accès alors à partir du moment qu'ils ont compris ça là ça va bien, mais ce n'était pas clair dans les exposés. **Très peu se sont aventurés dans ce dossier-là. (...)** Ils ont tendance à travailler beaucoup beaucoup la première partie distance-vitesse-accélération. **Ça, ils le font tous. Au final, ça rentre bien, mais l'inverse se fait moins bien** donc il a fallu que j'intervienne à la fin des exposés là-dessus. Je te dirais que c'est probablement l'aspect sur lequel il a fallu que je revienne le plus. (Ent post 6, ens 2)

#### **7. l'engagement dans une démarche de modélisation ouverte (N=2)**

P : **Au début ils sont mal à l'aise là-dedans. Ils sont déstabilisés, complètement mal à l'aise.** Ils regardent ça aller, **puis [ils disent] on n'en viendra jamais à bout**, mais tranquillement (...) on fait son petit chemin tranquillement pas vite et ils se rendent compte que finalement ce n'est peut-être pas si pire que ça. (Ent pré 1, ens 2)

#### **8. l'utilisation du matériel de laboratoire (N=3)**

P : J'ai 8 labs différents, 8 protocoles différents qui vont se rajouter à ceux que je leur impose (...) Ils travaillent malheureusement ou heureusement (...) avec du matériel qui ne connaisse pas qui n'ont jamais utilisé dans les niveaux précédents (...) Il y en a qui vont **travailler avec des chronomètres à étincelles des choses comme ça plus basiques un petit peu, mais pour les autres c'est encore là une source un petit plus de déstabilisation.** (Ent pré 1, ens 2)

#### **9. l'accessibilité au savoir théorique de référence dans diverses ressources (N=3)**

P : Actuellement mes équipes lorsqu'on rentre dans les périodes 4, 5, 6, ils trouvent beaucoup de « stock », ils en ont accumulé. **Ils sont allés sur Internet, mais ils se me demandent c'est quoi ce signe-là monsieur ? Oui ça s'appelle une intégrale. Ah ! On fait quoi avec ça ? Là ils se rendent compte que ce qu'ils ont trouvé est très avancé par rapport à leur niveau.** Donc c'est de relativiser les choses et de dire tu es rendu beaucoup trop loin mon homme, ma fille. Là on va venir travailler telle chose, telle chose. Au Cégep quand ils vont te montrer les intégrales, tu vas comprendre pourquoi ils te les montrent, mais rendu ici ne va pas aussi loin que ça. Donc les ramener au point de vue physique, au point de vue mathématique à notre niveau **parce que sur le Web ce n'est pas à leur niveau à part quelques bons sites Internet où ils ont fait une bonne vulgarisation spécialisée, mais des sites Internet adaptés pour les élèves du secondaire, il y en a très peu, il faut les trouver.** (Ent pré 5, ens 2)

#### **10. l'exploitation des ressources théoriques proposées sur le Web (N=2)**

P : Par contre, ce qu'ils trouvent sur Internet ne l'est pas nécessairement et certains sites sont beaucoup trop poussés par rapport à ce qu'ils peuvent faire. **Ça, c'est de travailler cette vulgarisation qu'ils trouvent (...) ils regardent ça puis ils sont découragés en partant qu'est-ce que c'est ça ?** Bon regarde on décortique. Ça oublie ça. On va aller chercher tel paramètre, tel paramètre et c'est là qu'ils ont besoin d'un encadrement autour d'eux pour être capables de discerner un petit peu le matériel. **C'est le « bog » d'Internet. Ils ramassent ça et qu'est-ce qu'il y a de bon là-dedans ? Qu'est-ce qu'il y a de bon ? En fait, tout peut être bon, mais qu'est-ce qu'il y a de bon pour nous ?** Il faut travailler là-dessus beaucoup, beaucoup, beaucoup **parce qu'il y en a qui ont une petite tendance à ramasser bien des choses sans égard du jugement qui vient autour**, ce qui fait qu'il faut faire attention, car les sources sont diverses (Ent post, ens 2)

#### **11. la présentation des laboratoires à la classe (N=5)**

P : **C'est un défi énorme pour eux parce qu'un ils ne sont pas habitués d'expliquer des choses en avant. Ils sont habitués à relater des faits. Ils sont habitués en français, ils font des exposés. Ils parlent d'un sujet x, y, z. Ils ne le développent pas nécessairement au niveau conceptuel.** Très souvent, ils vont apprendre un texte par cœur, ils vont en débâter un bout. **Ici c'est complètement différent. Il faut qu'ils expliquent le concept.**

<p><b>Il faut qu'ils modélisent pour que les gens comprennent. Il faut qu'ils utilisent des stratégies des astuces.</b> C'est ça dont je vais parler quand je vais les rencontrer en individuel. <b>Comment faire pour passer ce concept-là pour que ce soit le plus efficace possible ? Ils ont peur d'essayer des choses parce que je les sors de leur zone de confiance. Ils sont complètement à l'extérieur de leur zone de confiance et ça les insécurise</b> puis c'est plate ce que je vais dire, mais c'est voulu. Je veux les sortir de cette zone-là. <b>On va travailler dans un concept réel. Voici la réalité.</b> Après avoir fait ce lab, c'est quoi votre bilan ? Qu'est-ce qu'on en retire comme information ? Qu'est-ce qu'on peut considérer comme étant crédible et non crédible ? Est-ce que le lab que vous avez fait là vous l'avez jugé valable ou pas ? Pour quelles raisons ? <b>Donc retour sur l'expérience, retour sur la méthode scientifique, retour sur toute la structure qu'on a à l'intérieur de notre programme, mais ils n'ont jamais fait ça.</b> (Ent pré 5, ens 2)</p>
<p><b>12. le temps à disposition (N=1)</b></p> <p>P : (...) au niveau du travail certains <b>commencent à se rendre compte que ça roule, ça roule.</b> Là ils regardent <b>ce que j'appelle le facteur temps oups il me reste deux périodes pour tout finir oups là il faut que ça clenche.</b> Ce qui fait que j'avais plusieurs élèves en récupération ce midi alors il y avait des équipes qui sont venues travailler puis ils se sont installés là puis ils ont continué puis là <b>ils se rendent compte que le facteur temps commence à se faire sentir.</b> Au début ils disaient on a du temps on a 6 périodes pas de problème. Maintenant le décompte se fait plus sentir ce qui fait que <b>ç'a été un petit réajustement sur la gestion du temps</b> pour certains. (Ent post 4, ens 2)</p>
<p><b>13. les modalités de recueil des données</b></p> <p>Observé et non déclaré</p>
<p><b>14. la compréhension de savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, théories, etc.) par les élèves</b></p> <p>Observé et non déclaré</p>
<p><b>15. la compréhension du langage scientifique (symbolisme)</b></p> <p>Observé et non déclaré</p>

Du côté de l'enseignant, nous avons identifié trois principaux défis et difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant. Le **tableau 62** fait état de ces défis et difficultés.

Le premier défi associé à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant qui est de loin le plus prédominant est la gestion du travail des élèves (N=7). Comme le souligne l'enseignant 2, contrairement à un cours traditionnel de physique où il est plus simple pour l'enseignant d'exposer magistralement des contenus, de proposer aux élèves des exercices préalablement sélectionnés et d'engager les élèves dans des laboratoires dont les protocoles sont déjà fournis, dans une démarche de modélisation ouverte, l'enseignant a un rôle plus complexe ou plus exigeant : accompagner les élèves dans la réalisation de laboratoires diversifiés de manière à ce qu'ils puissent atteindre les objectifs tout en leur laissant une grande marge de manœuvre ; s'assurer que les élèves mobilisent et comprennent les modèles mathématiques en jeu ; participer de manière active dans les présentations des laboratoires en faisant ressortir les contenus disciplinaires essentiels et en veillant à la validité des contenus

transmis par les élèves ; gérer les aspects affectifs en vue d'une bonne réalisation du laboratoire en prévenant les difficultés importantes et en encourageant les élèves, etc.

Le second défi associé à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant concerne les facteurs de nature logistique (N=4). Il s'agit pour l'enseignant de s'assurer du bon fonctionnement du système informatique ainsi que des outils et instruments de mesure que les élèves doivent utiliser pour le recueil des données dans leur laboratoire.

Enfin, le troisième défi associé à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant touche les caractéristiques psychopédagogiques des élèves (N=2). Pour l'enseignant 2, il importe de proposer des laboratoires qui se situent dans la zone proximale de développement des élèves. Ainsi, la modélisation mathématique des phénomènes de physique ne peut engager les élèves dans la mobilisation de modèles mathématiques dont la complexité va au-delà des objectifs du programme de mathématique.

Tableau 62 : Défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant selon l'enseignant 2

Du côté de l'enseignant, les principaux défis et difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation sont...
<p><b>1. la gestion du travail des élèves (N=7)</b></p> <p>P Au niveau des difficultés par rapport à moi, c'est sûr que c'est de faire cette transition-là, <b>c'est de les pister, c'est de les guider, c'est de m'assurer qu'ils ne partent pas dans tous les chemins possibles et imaginables.</b> Je regarde leurs travaux, je regarde leurs trucs, je dis oh ça ne touche pas à ça, ne t'en vas pas vers là. <b>C'est toujours de les ramener, de les centrer par rapport à la tâche principale.</b> C'est facile de s'éloigner, c'est facile de s'écarter. <b>C'est de les ramener donc il faut que je m'assure que mes 8 équipes toujours toujours je les garde sur la bonne voie. Alors ça, c'est un défi à tout moment, c'est un défi.</b> Un moment donné il y a toujours une équipe qui va te sortir quelque chose. Ça vient d'où cette affaire-là ? Où est-ce que tu as ramassé ça ? Tu as vu ça sur Internet ? Parfait on va évaluer ce que tu viens de trouver là. Est-ce que c'est applicable dans ton contexte ? Oui, non ? (...) <b>Je pense pour l'enseignant c'est un plus gros défi que de faire un cours magistral en avant parce qu'il doit s'adapter très rapidement à toutes ces situations nouvelles qui arrivent,</b> mais c'est ce qui rend ça passionnant aussi donc il faut aimer ça le faire comme ça aussi là, ce qui fait que moi j'aime ça, ça ne me dérange pas, <b>mais c'est une adaptation constante que je dois faire.</b> (Ent post 4, ens 2)</p> <p>P : C'est sûr qu'actuellement ça fait 10 ans que je fais le projet donc après 10 ans je ne sais pas mal ce qui va arriver. J'anticipe plus les bogues, je m'excuse de l'anglicisme, je sais à peu près où ils vont s'enfarger donc je sais un peu plus comment intervenir en amont donc on va les préparer un petit peu plus sur tel, tel, tel aspect. Ça, ça se fait bien, <b>mais évidemment pour moi c'est un travail qui n'est pas facile parce que je n'ai pas juste à écouter un exposé. Je n'ai pas juste à évaluer un exposé. Je dois être impliqué dans l'exposé donc c'est du tac au tac donc il y a quelque chose qui sort paffff il ne faut pas que j'attende. Il faut que j'intervienne pour replacer le concept tout de suite parce qu'évidemment il y a des erreurs qu'ils ont faites et certains n'auront pas vu que c'était une erreur donc moi il faut que j'intervienne là-dessus en leur disant attention telle chose on va la traiter d'une autre façon, on va la regarder sur un autre aspect. Donc ça m'amène à improviser énormément. Je suis obligé d'improviser énormément parce que je ne sais pas ce qui va me</b></p>



**sortir, quel bord ça va arriver, mais ça me demande beaucoup de travail sur cet aspect-là de la présentation.** J'aime ça aussi le faire. Ça donne des défis puis c'est ce qui m'amène quelque part à enrichir ça d'une année à l'autre. (Ent pré 5, ens 2)

**P : C'est un énorme défi (...) de rendre ce projet humain et réalisable. [Avec ce projet], je les déstabilise au maximum** ce qui fait que j'ai un rôle beaucoup à jouer aussi au niveau de l'humain là-dedans. **La gestion affective est essentielle parce qu'un projet comme ça ne tiendrait plus à la route si l'on (...) ne relativisait pas la difficulté.** On essaie de comprendre où est le problème, puis pourquoi est-ce qu'on a ce problème-là. On vire autour, on essaie de trouver notre solution, mais il **faut travailler beaucoup, beaucoup, beaucoup l'aspect affectif dans ce type de projet.** On déstabilise beaucoup, mais ça implique aussi qu'il y a quelque chose au final qu'il faut travailler avec eux autres parce qu'ils vont tous partir en panique et ce n'est pas le but puis je suis content cette année ils ont tous fini avec le gros sourire (Ent post 6, ens 2)

## **2. les facteurs de nature logistique (disponibilité des ressources matérielles et temps) (N=4)**

**P : C'est plus de s'assurer que tout est fonctionnel étant donné que les buts sont ouverts aussi donc de donner le matériel nécessaire à ce qu'ils puissent avancer correctement** parce que c'est sûr que moi je leur remets une partie du matériel (...) Non il n'y a pas eu d'événements marquants à part **quelques systèmes qui se sont mis soudainement à arrêter de marcher,** mais à part à part ça, ça va bien (Ent post 2, ens 2)

**P : Pour les techniciens en arrière aussi [c'est bien plus compliqué]. Ça leur demande de fonctionner, ça prend du matériel qui marche tout le temps, ça prend un système informatique qui marche tout le temps.** Si ça décide de planter un matin cette affaire-là « wouppelaye » ça ne va pas bien donc c'est tout ça, ce qui fait que **c'est bien plus d'organisation, de stratégies, d'organisation.** (Ent pré 1, ens 2)

## **3. les caractéristiques psychopédagogiques des élèves (niveau de compréhension des élèves) (N=2)**

**P : Alors les principaux défis sont là-dessus (...)** Écoutez, on est en secondaire 5, vous avez un bagage mathématique. Moi je leur ai dit le premier cours de l'année je vais aller aussi loin en physique que vous êtes capable d'aller loin en math. Ça s'arrête là. Plus vous êtes capables d'aller en math, plus je vais être capable d'aller loin alors c'est ça qu'il faut qu'ils comprennent aussi. C'est que **les élèves ont un niveau et il y a un niveau qu'on ne pourra pas dépasser** alors il y a des contraintes, grosses contraintes. (Ent pré 5, ens 2)

Dans les entrevues postenregistrement, nous avons demandé à l'enseignant d'identifier des conditions ou des facteurs qui ont facilité ou entravé l'enseignement et l'apprentissage des modèles et des démarches visant l'acquisition des modèles. Le **tableau 63** fait état de cinq facteurs facilitant et de quatre facteurs entravant cet enseignement et apprentissage.

Le premier facteur facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation qui est de loin le plus prédominant dans le discours de l'enseignant 2 est l'utilisation de ressources informatiques textuelles ou visuelles (vidéos explicatives, simulations informatiques) en ligne (N=10).

Le second facteur est l'accès à des ouvrages de référence autres que les manuels scolaires (N=4). À ce sujet, l'enseignant mentionne que contrairement aux ressources proposées sur le Web, les contenus développés dans les livres de référence, même si ces ouvrages ne sont pas récents, sont davantage vulgarisés et, par conséquent, plus accessibles aux élèves.

Le troisième facteur est le recours à l'interdisciplinarité dans l'enseignement de la physique et des mathématiques par une contextualisation des savoirs (N=3). Dans la modélisation des phénomènes de la physique, l'enseignant souligne qu'il importe « de sortir des contextes de livre ». À cet égard, il préconise un enseignement interdisciplinaire physique-mathématique dans lequel les enseignants de physique et de mathématique proposent aux élèves des situations qui permettent d'appréhender des phénomènes de la réalité et non de phénomènes purement fictifs, d'une part, et dont les contenus de chacune de ces disciplines peuvent être mobilisés dans la discipline partenaire.

Le quatrième facteur facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation rapporté par l'enseignant 2 touche l'utilisation de dispositifs matériels concrets (N=2).

Enfin, les cinquième et sixième facteurs sont la connaissance préalable des modèles mathématiques par les élèves (N=1) et la résolution de problèmes d'application en vue d'appliquer les modèles dans d'autres contextes (N=1). Comme nous l'avons mentionné antérieurement, le projet proposé aux élèves est placé stratégiquement dans une période spécifique de l'année académique de manière à ce que les élèves puissent s'appuyer sur des contenus disciplinaires préalablement vus, et ce, plus particulièrement ceux qui touchent les modèles et la modélisation. À ce sujet, l'enseignant 2 déclare explicitement que : « L'enseignement préalable des modèles mathématiques favorise grandement les apprentissages des modèles physiques par la suite ». Quant à la résolution de problèmes d'application en vue d'appliquer les modèles dans d'autres contextes, elle favorise grandement l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation, car elle permet d'approfondir ces objets d'étude et de vérifier que les élèves les maîtrisent réellement. C'est pourquoi la proposition d'exercices d'application fait partie intégrante de la présentation des laboratoires. Elle correspond à ce que nous désignons par le déploiement du modèle dans le cadre conceptuel.

Tableau 63 : Facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2

<b>Pour moi, les principaux facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...</b>
<b>1. l'utilisation de ressources informatiques textuelles ou visuelles (vidéos explicatives, simulations informatiques) en ligne (N=10)</b>

P : Il y a **Allo Prof (...)** qui possède un résumé au niveau de la physique de 5. Ce sont des **synthèses, des résumés (...)** Ce sont des références que je leur donne en départ. Faites-vous un œil avec ça puis quand tu te fais un œil-là après ça tu vas être capable d'aller chercher peut-être quelque chose d'un petit peu plus construit puis là tu vas être capable de le comprendre un peu plus, **mais quand on a de bons résumés comme ça qu'on peut leur proposer bien à ce moment-là je pense que c'est facilitant** (Ent pré 1, ens 2)

P : Les **animations informatiques sont merveilleuses pour l'appropriation des modèles par les élèves parce qu'évidemment on va chercher nos visuels**. J'ai 40 % de ma classe qui sont des visuels alors en partant il faut que j'aie chercher mes visuels d'une manière ou d'un autre. Alors moi **quand j'enseigne je travaille simultanément toujours images et paroles**. J'ai mes auditifs, j'ai mes visuels. Alors c'est la même chose donc ces animations-là qui sont très accrocheuses souvent on installe ça, on travaille avec ça, **les jeunes trouvent ça amusant et c'est du visuel alors il y en a qui ne comprennent que par ça**. À partir du moment qu'ils vont voir la foutue corde se rapetisser sur le pendule, ils vont voir l'effet. Ils vont le comprendre alors pour moi **c'est vraiment rattacher ça à mes visuels toutes ces animations-là, ces images-là, ces petits extraits vidéo** (Ent pré 5, ens 2)

## 2. l'accès à des ouvrages de référence autres que les manuels scolaires (N=4)

P : Les **jeunes partent de plus en plus avec mes vieux livres actuellement**. Ma pile en arrière elle a beaucoup baissé alors j'ai de vieux livres, j'en ai partout dans mes armoires derrière toi et ma bibliothèque en avant donc les jeunes ramassent ces références-là **puis ils se rendent compte que le niveau de vulgarisation par rapport à Internet bien il est nettement plus avancé**. C'est tellement drôle j'avais une élève hier qui est arrivée en me disant : monsieur est-ce que je peux utiliser ça ? Elle dit c'est une ressource de 1896. J'ai dit montre-moi ça. Elle dit c'est **un vieux livre que mon grand-père avait sur la physique (...)** Je me suis mis à regarder ça puis (...) **ce qu'il y avait là-dedans c'est tout à fait correct, c'est tout à fait valable**. On change les variables, on change les unités de mesure, mais le concept il est là. Il était relativement bien développé c'est ça. Alors on était sur les distances, les vitesses moyennes, les vitesses instantanées bon c'était un concept (...) de 1896 ce qui fait que j'ai bien rit, mais elle l'utilise dans son travail. (Ent post 4, ens 2)

## 3. le recours à l'interdisciplinarité dans l'enseignement de la physique et des mathématiques par une contextualisation des savoirs (N=3)

P : **Sortir de ces contextes qui sont j'appelle ça moi des contextes qui de livre, sortir de ça puis tomber un peu plus dans ma réalité. Voilà, sortir des exemples qui sont en lien direct avec ce nous on fait ici donc à partir de là moi je suis capable de rattacher mes exemples de physique puis c'est la même chose en math, viens chercher mes exemples de physique pour faire tes problèmes de math. Fais l'inverse ce qui fait que de même on est capable de se faire un échange puis ce sont les élèves qui gagnent en fin de compte parce qu'ils sont capables de voir l'outil qu'ils apprennent en math, bon sens oui ça sert à quelque chose. On bataille fort pour ça** (Ent post 4, ens 2)

## 4. l'utilisation de dispositifs matériels concrets (N=2)

P : Il y en a qui ont travaillé les petites choses, il y a une équipe je ne me souviens plus si c'est dans ce groupe-là, mais ils ont travaillé carrément le **pendule de Foucault. Ils se sont fait un petit modèle puis bon voici le pendule**. On va le faire osciller puis là je change l'axe de rotation de la Terre. Le pendule est toujours dans le même sens, peu importe comment la Terre, ce qui fait qu'il n'y en a un qui l'a fait en bois. Il l'a monté en bois puis il l'a bâti puis tout ça, bon **quelque chose pour développer puis assimiler un petit peu, visualiser ses concepts**. Alors ça fait partie des choses qu'ils ont travaillées. (Ent post 6, ens 2)

## 5. la connaissance préalable des modèles mathématiques par les élèves (N=11)

P : Donc au niveau mathématique c'est sûr que lorsqu'on est arrivé moi **le projet il est placé à un endroit très précis dans l'année justement parce que la majorité de mes modèles mathématiques ont été préalablement travaillés** donc toute ma structure de lab, toute ma structure de graphique, toute ma structure, les fonctions mathématiques **on en a vu 7 ou 8 avec l'optique et le début de la mécanique donc toutes celles qui sont supposées d'arriver normalement en mécanique, ils les ont travaillées et en lien avec le prof de math celles que je ne peux pas appliquer en optique ici alors le prof de math les a travaillées (...)** donc lorsqu'on tombe dans les exponentielles par exemple ils vont tomber également en math... Je sais qu'ils **ont tous vu les équations par parties donc les graphiques par parties (...)** Donc, **ce sont toutes des choses que je vais réutiliser** alors on fait un petit lien entre ça. **Il y a beaucoup de modèles qui ont été préalablement travaillés et vus, mais vus dans d'autres contextes que ceux qu'ils ont actuellement** et c'est pour ça maintenant que c'est de travailler le lien. Regarde on l'a vu, on l'a travaillé. Regarde ton contexte maintenant. (Ent post 4, ens 2)

## 6. la résolution de problèmes d'application en vue d'appliquer des modèles dans d'autres contextes (N=1)

P : Pour ce qui est des exercices évidemment c'est d'approfondir quelque chose. **C'est beau d'avoir vu le concept, mais es-tu capable de l'appliquer dans une circonstance un petit peu différente ?** Es-tu capable de ressortir tes éléments, tes variables et tout ça ? Alors moi dépendamment de ce qui va être fait, **c'est à la fin de mes cours après les présentations des équipes que je vais peut-être intervenir si l'équipe a plus ou moins fait d'exercices et de mises en situation.** Oups moi je vais revenir après, bon **on va faire un petit mélange de tout ça et l'on va revenir travailler nos concepts (...)** Si l'équipe l'a beaucoup travaillé bien je vais en faire un peu moins donc **je m'adapte en fonction de la façon que l'équipe a présenté les choses (...)** **Les exercices nous permettent de pousser un peu plus, d'appliquer dans d'autres contextes** (Ent pré 5, ens 2)

Du point de vue des facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la modélisation, nous en rapportons cinq (**tableau 64**).

La faible qualité des matériels didactiques produits par les maisons d'édition apparaît comme étant le premier facteur rapporté par l'enseignant 2 (N=4). Deux éléments critiques sont évoqués : la non-validité des solutionnaires fournis aux élèves en raison de la présence d'un nombre important d'erreurs, d'une part, et la non-uniformité du langage adoptée par les maisons d'édition quant aux conventions d'écriture mathématique, d'autre part.

Le second facteur concerne le niveau non approprié des ressources informatiques en ligne (N=2). De manière générale, ces ressources ne sont pas vulgarisées pour les élèves du secondaire. Cela a comme conséquence de ne pas soutenir les élèves dans l'appropriation des contenus disciplinaires du cours, plus particulièrement en ce qui concerne les modèles et la modélisation.

Le troisième facteur est la faible compréhension ou maîtrise des savoirs disciplinaires chez certains élèves (N=2), notamment en regard de la compréhension de la notion de modèle en sciences qui diffère de celle en mathématiques et de la capacité des élèves à expliquer certains concepts en raison de leur non-maîtrise.

Enfin, les quatrième et cinquième facteurs rapportés une seule fois dans le discours de l'enseignant 2 sont l'enseignement des mathématiques décontextualisé (N=1) et les facteurs de nature logistique (N=1). C'est la mobilisation des concepts de mathématiques dans l'enseignement de la physique qui poserait problème, du fait que les mathématiques sont enseignées de manière décontextualisée.

Quant aux facteurs de nature logistique, l'enseignant a déclaré explicitement que : « La plus grosse contrainte dans mon enseignement des modèles est de nature logistique. Elle est liée au bon fonctionnement de mon système informatique ». Il rapporte qu'au début de son projet, des employés des services informatiques de la commission scolaire avaient remplacé les ordinateurs de la classe sans effectuer une réinstallation des logiciels utilisés par l'enseignant.

Tableau 64 : Facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation selon l'enseignant 2

Pour moi, les principaux facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont...
<b>1. La faible qualité des matériels didactiques produits par les maisons d'édition (N=4)</b>
<p>P : Je considère toujours que <b>les volumes des maisons d'édition ne sont pas au point. Je n'en ai vu aucun qui était personnellement valable.</b> C'est pour ça que je fais encore mon propre cahier d'exercices. Je fais encore mes propres notes de cours. Je produis tout moi-même. J'ai un cahier d'environ trois cents pages en optique et en mécanique que je fais moi-même et que je donne directement à mes élèves (...) Tu sais on a un volume de physique puis je sais qu'en mathématiques ils ont eu le même problème : <b>il n'y a pas un solutionnaire de bon, il y tellement d'erreurs dans les corrigés qu'il faut le refaire au complet</b> (...) Moi les maisons d'édition j'ai fait un gros x là-dessus. Je me suis gardé un volume de base simplement pour que le jeune ait quelque chose chez lui de vulgarisé à son niveau, mais le reste « Oh my god ! ». <b>Il faut refaire les exercices au complet, il faut refaire les solutionnaires au complet. C'est assez atroce.</b> Moi je trouve ça un peu incohérent ce qu'on nous présente. Il y a un manque terrible au niveau des maisons d'édition au Québec là-dessus. (Ent post 6, ens 2)</p> <p>P : La problématique souvent dans les matériels, surtout en physique, dépendamment des maisons d'édition, <b>c'est qu'elles n'adoptent pas toujours les mêmes systèmes de convention. Les foutues conventions. Il y en a qui utilise un système de convention, l'autre utilise un autre, puis ils ne se jasant pas là ce qui fait que ça devient problématique là-dessus</b> (...) <b>Il n'y a pas un auteur qui a la même vision sur les conventions. Il n'y a pas d'uniformité là-dedans non plus. Alors les élèves sont tous perdus.</b> Ils ne prennent même pas les mêmes symboles de variable. <b>Il y en a pour qui la distance c'est <math>d</math>, l'autre c'est <math>x</math>, l'autre c'est <math>s</math> alors tu fais quoi ? Le jeune lit ça oups... Il y en a un que c'est delta <math>x</math>, l'autre c'est delta <math>s</math> puis l'autre c'est delta <math>t</math>.</b> Le jeune regarde ça et il dit ouin c'est quoi celui-là ? <b>C'est pour ça que moi mes meilleures références c'est encore mes vieux livres de physique.</b> (Ent pré 1, ens 2)</p>
<b>2. Le niveau non approprié des ressources informatiques en ligne (N=3)</b>
<p>P : <b>La plus grande limite de plusieurs ressources en ligne évidemment, c'est leur niveau de vulgarisation</b> (...) Donc il y a des sites effectivement qui ne sont pas faits pour des élèves du secondaire. <b>On vise vraiment une clientèle universitaire et même postuniversitaire.</b> On vise vraiment au niveau maîtrise, doctorat. (Ent pré 1, ens 2)</p>
<b>3. La faible compréhension ou maîtrise des savoirs disciplinaires chez certains élèves (N=2)</b>
<p>P : L'autre difficulté qu'ils ont c'est qu'<b>en mathématiques ça marche toujours super bien.</b> Ils font une fonction parabolique hey regarde ils font ça sur la petite calculatrice wow ce n'est pas ma réalité. <b>Le modèle est parfait. En sciences, ce n'est pas ça.</b> Là, les jeunes regardaient leurs graphiques, bien non ce n'est pas une parabole ça là. Puis là encore en secondaire 5 ils vont me tracer ça au point à point ce qui fait que là ils regardent ça puis... Bien ils n'ont jamais fait. Dans les livres de math, c'est toujours beau. <b>Ils ne connaissent pas ça un modèle issu de données expérimentales et ça devrait être la base parce que c'est ça la réalité.</b> Moi je me tue à leur dire qu'<b>une fonction qui arrive parfaitement ça n'existe pas.</b> Il y a toujours un paramètre qui va venir influencer quelque part. Bien en math on ne travaille que des contextes parfaits et ça, je trouve ça plate (...) (Ent post 6, ens 2)</p> <p>P : <b>Bien oui ils ont eu des difficultés à expliquer des choses. Il y a certains concepts qui n'ont pas réussi à faire le tour, qu'ils n'ont pas réussi à maîtriser totalement et c'est un peu normal aussi. C'est mon rôle après</b></p>

de ramasser tout ça et de venir finaliser le tout. Mais dans l'ensemble ils ont fait je te dirais une bonne tentative. **Dans la plupart des exposés, ils ont abordé la majorité des éléments qu'ils devaient apporter, certains plus facilement que d'autres.** (Ent post 6, ens 2)

#### 4. L'enseignement des mathématiques décontextualisé (N=1)

P : Les élèves ont beaucoup de difficulté à mobiliser des concepts de math pour les appliquer en physique (...) En mathématique de 4<sup>e</sup> et de 5<sup>e</sup> secondaire, on enseigne majoritairement à partir de variables qui sont des lettres : f de x égale tatata tatata. Moi je leur dis f de x je ne le connais pas. Je leur demande : f de x c'est quoi ça ? Ça ne veut rien dire f de x. Qu'est-ce que tu as ? Ah une vitesse OK c'est juste ça. **Moi j'ai des mots réels, les autres ont de la généralité de lettres. Juste ça, ça ne passe pas.** Juste ça c'est un travail incroyable d'une année à leur amener à faire une transition mathématique et **ce que je reproche au programme de math c'est qu'on ne commence pas ce travail en math.** Pourquoi est-ce qu'on me fou toujours f de x égale ça ? Pourquoi est-ce qu'on ne me met pas une fonction réelle, par exemple le débit d'une rivière égale. Pourquoi est-ce qu'on ne le fait pas ? **Donc déjà si on commençait à voir des contextes réels en mathématiques, je ramerais moins en physique de 5<sup>e</sup> secondaire.** Ça, c'est clair. C'est la première chose. (Ent post 6, ens 2)

#### 5. Les facteurs de nature logistique : fonctionnement des supports informatiques à disposition des élèves (N=1)

P : La plus grosse contrainte dans mon enseignement des modèles est de nature logistique. Elle est liée au bon fonctionnement de mon système informatique. Si demain matin mon système informatique plante là c'est clair que... Un moment donné quand je suis arrivé au début du projet, ils m'avaient tout changé les ordinateurs, ils n'avaient pas réinstallé mes programmes, ce qui fait que là on a appelé d'urgence à la commission scolaire. Viens me rentrer mes programmes au plus vite dans mes affaires parce que regarde, ils ont changé évidemment, mais ils n'ont pas été capables de faire une image pour remettre le nouvel ordi avec tout ce qu'il avait dessus ce qui fait qu'on est arrivé... Ils ont fait ça à distance eux autres. Ils n'ont pas à se déplacer eux autres. Il n'y a pas de trouble avec ça, mais je suis arrivé je n'avais plus rien sur mes systèmes. **Regarde, tout obligé de reconfigurer ça à la dernière seconde. C'est le genre de contrainte que je ne veux pas revivre.** (Ent post 4, ens 2)

## 9. RÉSULTATS ASSOCIÉS À LA RELATION ENTRE PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET ACQUISITIONS CONCEPTUELLES CHEZ LES ENSEIGNANTS 1 ET 2

Dans cette section des résultats, nous établissons une relation entre les pratiques d'enseignement et les acquisitions conceptuelles des élèves dans les deux classes. Pour ce faire, nous comparons dans un premier temps la distribution des réponses et le pourcentage d'élèves des deux classes ayant répondu adéquatement à chacune des questions à réponses multiples du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en physique cinématique ([annexe 11](#)). Pour chacune des questions, nous générons des matrices de facettes de savoir simplifiées de chacun de ces groupes sur la base de cinq indicateurs : 1) la continuité du savoir (fréquence d'apparition des facettes), 2) l'ancrage des facettes selon les contextes de traitement des thèmes disciplinaires, 3) la source d'émergence du savoir, 4) l'ancrage des facettes selon les phases de la démarche de modélisation, 5) la prise en charge du savoir par les acteurs de la classe. Les résultats sont détaillés selon l'ordre chronologique des questions du questionnaire sur les connaissances de base des élèves en physique cinématique. Seuls les résultats associés aux questions

où nous avons pu repérer des facettes de savoir dans l'une ou l'autre des deux séquences d'enseignement y seront présentés. C'est pourquoi la question 1 est exclue des résultats. De manière à réduire l'espace de description, les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacune des questions sont présentées à l'[annexe 26](#)).

### 9.1 Résultats associés la question 2 du questionnaire d'enquête

La **question 2** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation de la distance et du déplacement d'un mobile qui se déplace sur une trajectoire horizontale. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (83 %) est nettement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (59 %) ([tableau 65](#)). Une part importante des élèves du groupe 1 (7 élèves sur 27 ; 29 %) confondent les concepts de distance et de déplacement. Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes comportent deux facettes communes (celles marquées d'un astérisque) ([annexe 26, tableaux 1 et 2](#)). La continuité des facettes de savoir de ces deux matrices est très faible sauf pour 2 d'entre elles qui ont une continuité faible (celles soulignées). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=7$ ) étant inférieure à celle du groupe 1 ( $F_t=11$ ) nous indique que la plus grande compréhension des élèves du groupe 2 à cette question ne peut s'expliquer uniquement par la continuité du savoir, mais par d'autres indicateurs microscopiques. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments d'exercisation (7 facettes sur 11) de manière décontextualisée (7 facettes sur 11) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (10 facettes sur 11), et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (5 facettes sur 11). Dans le groupe 2, outre les moments d'exercisation, les facettes de savoir sont introduites dans la réalisation des laboratoires (2 facettes sur 7) et les moments de théorisation (2 facettes sur 7). Par ailleurs, les facettes n'émergent pas de manière décontextualisée, mais plutôt de situations fictives (4 facettes sur 7) ou de situations expérimentales (3 facettes sur 7) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (7 facettes sur 7) de la démarche de modélisation. Aussi, dans le groupe 2, la prise en charge du savoir est autant du côté des élèves ( $E=3$ ) que de celui de l'enseignant ( $P=3$ ).

Tableau 65 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 2 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation de la distance et du déplacement d'un mobile qui se déplace sur une trajectoire horizontale				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	16	2	7	2	59
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	15	1	1	1	<u>83</u>

## 9.2 Résultats associés aux questions 3, 4, 5 et 6 du questionnaire d'enquête

La **question 3** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation de la variation de la position d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (83 %) est légèrement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (81 %) (**tableau 66**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes comportent 6 facettes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 3 et 4**). La continuité des facettes de savoir de ces deux matrices est très faible sauf pour 3 d'entre elles dont la continuité est faible (celles soulignées). Comme c'est le cas de la question précédente, même si la fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_i=13$ ) est nettement inférieure à celle du groupe 1 ( $F_i=29$ ), la performance des élèves du groupe 2 n'est pas pour autant plus faible que celle des élèves du groupe 1. Par conséquent, l'égalité des performances des élèves des deux groupes pourrait s'expliquer par d'autres indicateurs que la continuité du savoir. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (24 facettes sur 29), émergent en grande partie de situations fictives (14 facettes sur 29) ou de manière décontextualisée (9 facettes sur 29) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (28 facettes sur 29) et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (22 facettes sur 29). Dans le groupe 2, la configuration des facettes de savoir est toute autre : elles sont introduites dans la présentation des laboratoires (8 facettes sur 13 ; dans 4 laboratoires sur 8 : A, C, D et E), émergent de situations expérimentales (11 facettes sur 13) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (11 facettes sur 13) de la démarche de modélisation,



et sont prises en charge par les élèves ( $E=7$ ) ou conjointement par l'enseignant et les élèves ( $PetE=4$ ).

Tableau 66 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 3 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation de la variation de la position d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	22	1	2	2	81
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	15	1	1	1	<u>83</u>

La **question 4** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la suite de la question précédente. Elle porte sur l'interprétation de la vitesse d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 1 (48 %) est supérieur à celui des élèves du groupe 2 (22 %) (**tableau 67**). En sélectionnant à tort la réponse A à cette question, plusieurs élèves des deux groupes pensent qu'une accélération constante est associée à une augmentation de la variation de la vitesse et qu'une vitesse constante est associée à une variation de vitesse constante, ce qui indique une confusion entre les concepts de vitesse et de variation de la vitesse. Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes ne comportent que 2 facettes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 5 et 6**). La matrice du groupe 1 est non seulement plus élaborée que celle du groupe 2 sur le plan de la diversité des facettes de savoir qui la structurent, mais aussi sur le plan de leur fréquence d'apparition. Contrairement à celle du groupe 2 où les deux facettes de savoir sont de continuité très faible, la matrice du groupe 1 comporte 2 facettes de savoir de faible continuité (celles soulignées). Ici, la fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_i=2$ ) qui est nettement inférieure à celle du groupe 1 ( $F_i=19$ ) pourrait expliquer la plus faible performance des élèves du groupe 2 à cette question, même si les facettes de savoir dans le groupe 1 sont essentiellement introduites dans des moments d'exercisation (10 facettes sur 19), émergent en grande partie de situations fictives (10 facettes sur 19) ou de manière décontextualisée

(8 facettes sur 19) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (18 facettes sur 19) et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (11 facettes sur 19).

Tableau 67 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 4 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation de la vitesse d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	12	13	1	1	<b>48</b>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	13	4	1	0	22

La **question 5** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la suite de la question précédente. Elle porte sur la reconnaissance du graphique position-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des deux groupes d'élèves du groupe 2 (61 %) est légèrement supérieur à celui du groupe 1 (57 %) (**tableau 68**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes ne comportent que des facettes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 7 et 8**). Sur le plan de la continuité du savoir, la matrice du groupe 1 ne comporte qu'une seule facette dont la continuité est faible alors que la matrice du groupe 2 comporte 2 facettes de continuité faible et une facette de continuité moyenne (celles soulignées). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=29$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=13$ ), ce qui pourrait expliquer performance plus grande des élèves du groupe 2 à cette question en plus des autres modalités de configuration des facettes de savoir qui diffèrent dans les deux groupes. En effet, dans le groupe 1, les facettes de savoir sont toutes introduites dans des moments de théorisation (13 facettes sur 13) et émergent en grande partie de situations fictives (8 facettes sur 13) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (13 facettes sur 13) et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (6 facettes sur 13). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans la réalisation des laboratoires (12 facettes sur 29) ou dans la présentation des laboratoires (16 facettes sur 29 ; dans 5 laboratoires sur 8 : C, D, E, F et G). Elles émergent en

grande partie de situations expérimentales (16 facettes sur 29) au sein des phases *Investiguer* (11 facettes sur 29) ou *Conceptualiser et déployer* (18 facettes sur 29) de la démarche de modélisation, et sont la plupart prises en charge par les élèves (18 facettes sur 29).

Tableau 68 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 5 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance du graphique position-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	15	1	11	0	57
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	11	0	7	0	<u>61</u>

La **question 6** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la suite de la question précédente. Elle porte sur la reconnaissance du graphique accélération-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (61 %) est nettement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (30 %) (**tableau 69**). En sélectionnant à tort la réponse C à cette question, une part importante des élèves du groupe 1 (11 élèves sur 27 ; 41 %) interprète une accélération constante par une droite horizontale de pente positive et une vitesse constante par une droite horizontale non nulle dans un graphique accélération-temps, ce qui indique une confusion entre les tracés des graphiques vitesse-temps et accélération-temps. Toutes les facettes de savoir des matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 9 et 10**). La continuité des facettes de savoir de ces deux matrices est très faible sauf pour 2 d'entre elles qui sont faibles ou moyennes (celles soulignées). Ici, l'écart de réussite important entre les deux groupes pourrait s'expliquer par la fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t = 22$ ) qui est supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t = 11$ ) en plus des autres indicateurs microscopiques. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (10 facettes sur 11), émergent de situations fictives (7 facettes sur 11) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque

(10 facettes sur 11), et elles sont prises en charge par l'enseignante (4 facettes sur 11) ou conjointement par l'enseignante et les élèves (7 facettes sur 11). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans la présentation des laboratoires (18 facettes sur 22 ; dans 5 laboratoires sur 8 : C, D, E, F et G). Elles émergent en grande partie de situations expérimentales (14 facettes sur 22) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (19 facettes sur 22) de la démarche de modélisation, et sont prises en charge par les élèves (15 facettes sur 22) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (7 facettes sur 22).

Tableau 69 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 6 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance du graphique accélération-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	4	8	11	4	30
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	1	11	3	3	<u>61</u>

### 9.3 Résultats associés aux questions 7, 8, 9, 10 et 11 du questionnaire d'enquête

La **question 7** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation d'une vitesse instantanée d'un mobile qui se déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps. Comme le montre le **tableau 70**, le pourcentage de réussite des élèves à cette question est très fort dans les deux groupes en raison de la facilité de cette question qui est purement d'ordre mathématique. Cependant, nous ne pouvons mettre en relation les pratiques d'enseignement avec la compréhension des élèves par rapport à cette question, car nous n'avons repéré aucune facette de savoir en lien avec cette question dans l'une ou l'autre des pratiques d'enseignement des deux enseignants.

Tableau 70 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 7 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation d'une vitesse instantanée d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	1	26	0	0	96
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	18	0	0	<u>100</u>

La **question 8** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur le calcul d'une distance parcourue par un mobile qui se déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (89 %) est nettement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (63 %) (**tableau 71**). Les facettes des matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont toutes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 11 et 12**). Les deux facettes de la matrice des facettes de savoir du groupe 1 sont de continuité faible alors qu'une seule a une continuité faible dans la matrice du groupe 2 (celles soulignées). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_i=9$ ) étant inférieure à celle du groupe 1 ( $F_i=14$ ) nous indique que la plus grande compréhension des élèves du groupe 2 à cette question ne peut s'expliquer uniquement par la continuité du savoir, mais par d'autres indicateurs microscopiques. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de correction d'exercices (8 facettes sur 14) ou de théorisation (6 facettes sur 14), émergent de situations fictives (9 facettes sur 14) ou de manière décontextualisée (5 facettes sur 14) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (14 facettes sur 14), et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (7 facettes sur 14) ou conjointement par l'enseignante et les élèves (5 facettes sur 14). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans les moments de théorisation (6 facettes sur 9), émergent de situations fictives (6 facettes sur 9) ou de situations expérimentales (3 facettes sur 9) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (9 facettes sur 9) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, la prise en charge du savoir est autant du côté des élèves ( $E=4$ ) que de celui de l'enseignant ( $P=4$ ).

Tableau 71 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 8 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Calcul d'une distance parcourue par un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	3	5	17	2	63
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	0	16	2	<u>89</u>

La **question 9** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur le calcul d'une vitesse moyenne d'un mobile qui se déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves est sensiblement le même pour les deux groupes : il se situe autour de 60 % (**tableau 72**). Comme nous n'avons pas repéré explicitement de facettes de savoir associées à la vitesse moyenne à partir d'un graphique vitesse-temps dans le groupe 2, nous ne rendons compte que des facettes de savoir du groupe 1. La matrice des facettes de savoir simplifiée associée à cette question pour le groupe 1 comporte quatre facettes dont une ayant une forte continuité (celle soulignée) (**annexe 26, tableau 13**). Dans ce groupe, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (22 facettes sur 24), émergent de situations fictives (12 facettes sur 24) ou de manière décontextualisée (13 facettes sur 24) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (24 facettes sur 24), et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (18 facettes sur 24). Ce qui explique un pourcentage de réussite assez faible, même si la fréquence d'apparition totale des facettes est assez élevée. Quant au groupe 2, nous pensons que les élèves ont développé une compréhension du calcul de la vitesse moyenne dans un autre contexte que celui d'un graphique vitesse-temps, notamment dans le contexte d'un graphique position-temps.

Tableau 72 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 9 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Calcul d'une vitesse moyenne d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	6	15	5	1	56
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	3	11	4	0	<u>61</u>

La **question 10** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur le calcul d'une accélération instantanée d'un mobile qui se déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (67 %) est supérieur à celui des élèves du groupe 1 (52 %) (**tableau 73**). Si les facettes des matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont toutes communes (celles marquées d'un astérisque), dans le groupe 1 elles sont toutes de continuité moyenne alors que dans le groupe 2 elles sont de continuité faible (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 14 et 15**). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_i=7$ ) étant nettement inférieure à celle du groupe 1 ( $F_i=35$ ) nous indique que la plus grande compréhension des élèves du groupe 2 à cette question ne peut s'expliquer par la continuité du savoir, mais par d'autres indicateurs microscopiques. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (17 facettes sur 35), de réalisation ou correction d'exercices (18 facettes sur 35). Elles émergent de situations fictives (27 facettes sur 35) ou de ressources didactiques (8 facettes sur 35) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (35 facettes sur 35) et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (21 facettes sur 35). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont non seulement introduites dans les moments de théorisation (3 facettes sur 7), mais aussi dans les moments de présentation des laboratoires (3 facettes sur 7 ; dans 3 laboratoires sur 8 : A, B et C). Elles émergent de situations fictives (3 facettes sur 7) ou de situations expérimentales (2 facettes sur 7) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (6 facettes sur 7) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, la prise en charge du savoir est davantage du côté des élèves (3 facettes sur 7).

Tableau 73 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 10 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Calcul d'une accélération instantanée d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	11	9	1	3	52
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	12	5	1	0	<u>67</u>

La **question 11** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur le calcul d'une accélération moyenne d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (72 %) est légèrement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (63 %) (**tableau 74**). Aucune des facettes de savoir des matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes n'est commune (**annexe 26, tableaux 16 et 17**). La continuité des facettes de savoir des deux groupes est très faible sauf pour une dans le groupe 2 qui est faible (celle soulignée). Dans ces deux groupes, la fréquence d'apparition totale des facettes n'est pas très élevée, bien que la fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=7$ ) qui est légèrement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=3$ ). Si le faible écart de réussite entre les deux groupes peut s'expliquer par la composition différente des matrices des facettes de savoir ou par leur fréquence d'apparition, d'autres indicateurs microscopiques peuvent également entrer en jeu. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont toutes introduites dans des moments d'exercisation (3 facettes sur 3), émergent de manière décontextualisée (3 facettes sur 3) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (3 facettes sur 3), et elles sont prises en charge essentiellement par l'enseignante (2 facettes sur 3). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : toutes les facettes de savoir sont introduites dans la réalisation des laboratoires (7 facettes sur 7 ; dans 3 laboratoires sur 8 : A, B et C) et émergent de situations expérimentales au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (7 facettes sur 7) de la démarche de modélisation. Dans ce groupe, elles sont davantage prises en charge conjointement par l'enseignant et les élèves (4 facettes sur 7).



Tableau 74 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 11 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Calcul d'une accélération moyenne d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	0	17	7	3	63
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	13	4	1	<u>72</u>

#### 9.4 Résultats associés aux questions 12 et 13 du questionnaire d'enquête

La **question 12** du questionnaire d'enquête porte sur la comparaison des vitesses de deux mobiles à partir d'un schéma position-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite est relativement très faible pour les deux groupes d'élèves : 22 % pour le groupe 1 et 17 % pour le groupe 2 (**tableau 75**). Si les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes présentent quelques facettes communes, nous relevons dans le premier groupe deux facettes de savoir de continuité moyenne (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 18 et 9**). Dans le groupe 1, la fréquence d'apparition totale des facettes ( $F_t = 30$ ) est supérieure à celle du groupe 2 ( $F_t = 23$ ). Comme c'est le cas des autres questions, la configuration des facettes de savoir selon les indicateurs micropsopiques autres que celui de la continuité du savoir diffère entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (26 facettes sur 30), émergent de situations fictives (14 facettes sur 30) ou de manière décontextualisée (6 facettes sur 30) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (30 facettes sur 30), et elles sont prises en charge essentiellement par l'enseignante (22 facettes sur 30). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont introduites dans la réalisation des laboratoires (9 facettes sur 23) ou la présentation des laboratoires (12 facettes sur 23 ; dans 4 laboratoires sur 8 : A, C D et G), émergent de situations fictives (10 facettes sur 23), de manière décontextualisée (7 facettes sur 23) ou de situations expérimentales (7 facettes sur 23) au sein des phases *Investiguer* (9 facettes sur 23) ou *Conceptualiser et déployer* (14 facettes sur 23) de la démarche de modélisation, et elles sont davantage prises en charge par les élèves (12 facettes sur 23) ou conjointement par les deux acteurs

(7 facettes sur 23). Mais la différence importante de ces configurations quant aux indicateurs d'ordre microscopique retenus ne semble pas suffisante pour expliquer le faible pourcentage de réussite et sa quasi-absence d'écart entre les deux groupes d'élèves. La majorité des élèves du groupe 1 (15 élèves sur 27 ; 56 % des élèves) de même que la majorité des élèves du groupe 2 (11 élèves sur 18 ; 61 % des élèves) ont sélectionné la réponse C à cette question. Par conséquent, ils pensent que les deux coureurs atteignent la même vitesse aux instants 1 et 4 de la course alors que ceux-ci sont aux mêmes positions, ce qui indique une confusion entre les concepts de position et de vitesse ou la difficulté à analyser une telle situation.

Tableau 75 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 12 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Comparaison des vitesses de deux mobiles à partir d'un schéma position-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	5	1	15	6	<u>22</u>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	3	1	11	3	17

La **question 13** du questionnaire d'enquête qui s'inscrit dans la continuité de la question précédente porte sur la comparaison des accélérations de deux mobiles à partir d'un schéma position-temps. Pour cette question, le pourcentage de réussite est beaucoup plus élevé que pour la question précédente et est similaire pour les deux groupes d'élèves : dans le groupe 2 (67 %), il est légèrement supérieur à celui du groupe 1 (63 %) (**tableau 76**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes présentent plusieurs facettes communes, et dans chacun des deux groupes, nous relevons des facettes de savoir de continuité faible ou moyenne (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 20 et 21**). Dans le groupe 1, la fréquence d'apparition totale des facettes ( $F_t = 42$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 2 ( $F_t = 26$ ). Comme dans les autres questions, la configuration des facettes de savoir selon les indicateurs microscopiques autres que celui de la continuité du savoir pourrait expliquer le fait que les élèves du groupe 2 réussissent autant cette question que ceux du groupe 1. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (23 facettes sur 42) ou d'exercisation

(réalisation ou correction) (19 facettes sur 42), émergent de situations fictives (17 facettes sur 42), de ressources didactiques (14 facettes sur 42) ou de manière décontextualisée (12 facettes sur 42) en dehors d’une démarche de modélisation quelconque (42 facettes sur 42), et elles sont prises en charge essentiellement par l’enseignante (36 facettes sur 42). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont introduites dans la réalisation des laboratoires (10 facettes sur 26) ou la présentation des laboratoires (8 facettes sur 26 ; dans 6 laboratoires sur 8 : A, B, C, D, E et F), émergent de situations expérimentales (12 facettes sur 26) ou de situations fictives (7 facettes sur 26) au sein des phases *Investiguer* (11 facettes sur 26) ou *Conceptualiser et déployer* (15 facettes sur 26) de la démarche de modélisation. Cependant, elles sont davantage prises en charge par les élèves (10 facettes sur 23) ou par l’enseignant (9 facettes sur 23).

Tableau 76 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 13 du questionnaire d’enquête

Contenus disciplinaires	Comparaison des accélérations de deux mobiles à partir d’un schéma position-temps				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d’élèves de l’enseignante 1	5	17	0	5	63
Groupe d’élèves de l’enseignant 2	4	12	0	2	<u>67</u>

## 9.5 Résultats associés aux questions 14 et 15 du questionnaire d’enquête

La **question 14** du questionnaire d’enquête porte sur la comparaison des vitesses d’un mobile en mouvement vertical ascendant (mobile propulsé à la verticale suivi d’une chute libre) à deux instants donnés. Pour cette question, le pourcentage de réussite est plus élevé dans le groupe 2 (78 %) que dans le groupe 1 (59 %) (**tableau 77**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes comportent 3 facettes de savoir communes, et dans chacun des deux groupes, nous recensons des facettes de savoir de continuité faible ou moyenne (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 22 et 23**). Dans le groupe 1, la fréquence d’apparition totale des facettes ( $F_t = 13$ ) est légèrement inférieure à celle du groupe 2 ( $F_t = 19$ ). Outre la continuité du

savoir, d'autres indicateurs micropsopiques sont nécessaires pour expliquer l'écart de performance entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (10 facettes sur 13) ou d'exercisation (correction) (3 facettes sur 13), émergent de situations fictives (7 facettes sur 13), de ressources didactiques (3 facettes sur 42) ou de manière décontextualisée (3 facettes sur 13) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (13 facettes sur 13), et elles sont prises en charge essentiellement par l'enseignante (6 facettes sur 13). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont introduites dans la réalisation des laboratoires (5 facettes sur 19) ou la présentation des laboratoires (12 facettes sur 19 ; dans 4 laboratoires sur 8 : A, B, G et E), émergent de situations expérimentales (11 facettes sur 19) ou de démonstrations expérimentales (5 facettes sur 19) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (16 facettes sur 19) de la démarche de modélisation, et elles sont davantage prises en charge par les élèves (11 facettes sur 19).

Tableau 77 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 14 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Comparaison des vitesses d'un mobile en mouvement vertical ascendant (mobile propulsé à la verticale suivi d'une chute libre) à deux instants donnés				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	3	16	4	4	59
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	3	14	1	0	<u>78</u>

La **question 15** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur la comparaison des vitesses d'un mobile en mouvement vertical ascendant à deux instants donnés. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves est sensiblement le même pour les deux groupes : il est très faible pour les deux groupes et se situe autour de 40 % (**tableau 78**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à cette question sont essentiellement les mêmes sur le plan de la composition. Elles partagent donc un grand nombre de facettes communes. Toutes les facettes de ces deux groupes ont une continuité très faible sauf pour une facette du groupe 1 et deux facettes du groupe 2 qui ont une continuité faible ou moyenne (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 24 et 25**). Dans le groupe 1, la fréquence d'apparition totale des facettes ( $F_t = 17$ ) est inférieure à celle du groupe 2 ( $F_t = 27$ ), et

pourtant le pourcentage de réussite est plus faible dans le groupe 2. Sur le plan de la configuration des facettes de savoir, celle du groupe 1 est similaire aux situations précédentes en ce sens que les facettes sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (10 facettes sur 17) ou d'exercisation-correction (6 facettes sur 17), émergent de situations fictives (10 facettes sur 17), de ressources didactiques (3 facettes sur 17) ou de manière décontextualisée (3 facettes sur 17) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (17 facettes sur 17), et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (6 facettes sur 17) ou de manière conjointe par l'enseignante et les élèves (6 facettes sur 17). De même, pour le groupe 2, la configuration est similaire aux situations précédentes en ce sens que les facettes sont essentiellement introduites dans la réalisation des laboratoires (8 facettes sur 27) ou la présentation des laboratoires (13 facettes sur 27 ; dans 4 laboratoires sur 8 : A, B, G et E), émergent de situations expérimentales (6 facettes sur 27) ou de démonstrations expérimentales (13 facettes sur 27) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (20 facettes sur 27) de la démarche de modélisation, et elles sont davantage prises en charge par les élèves (13 facettes sur 27). En raison d'une part importante des élèves des deux groupes qui ont sélectionné à tort la réponse B ou la réponse D à cette question (12 élèves sur 27, 44 % des élèves pour le groupe 1 ; 11 élèves sur 18, 61 % des élèves pour le groupe 2), nous postulons que le faible pourcentage de réussite à cette question et le faible écart entre les deux groupes s'expliquent par une facette de savoir centrale, la facette « C- Dans un mouvement en chute libre, à hauteurs égales, les vitesses sont égales », qui est introduite seulement une fois dans le groupe 1 et que n'est pas introduite dans le groupe 2.

Tableau 78 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 15 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Comparaison des vitesses d'un mobile en mouvement vertical ascendant à deux instants donnés				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	3	7	12	5	<u>44</u>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	6	7	5	39

## 9.6 Résultats associés à la question 16 du questionnaire d'enquête

La **question 16** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation des signes de l'accélération d'un mobile en mouvement vertical ascendant dans son mouvement ascendant et dans son mouvement descendant. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (83 %) est nettement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (56 %) (**tableau 79**). Selon les conventions en vigueur, nous avons considéré deux choix de réponse possibles (A et C). Ces conventions sont cohérentes avec les facettes de savoir construites dans les deux classes. Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de plusieurs facettes communes (celles marquées d'un astérisque) et elles présentent des facettes de continuité faible, moyenne, et même très forte (celles soulignées) (**annexe 26, tableaux 26 et 27**). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=37$ ) est supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=24$ ). La plus grande compréhension des élèves du groupe 2 à cette question peut s'expliquer non seulement par la continuité du savoir, mais aussi par les autres indicateurs microscopiques. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de correction d'exercices (14 facettes sur 24) ou de théorisation (7 facettes sur 24). Elles émergent de démonstrations expérimentales (14 facettes sur 24) ou de situations fictives (8 facettes sur 24) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (24 facettes sur 24) et sont en grande partie prises en charge par l'enseignante (12 facettes sur 24) ou conjointement par l'enseignante et les élèves (8 facettes sur 24). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont non seulement introduites dans les moments d'exercitation et de théorisation, mais aussi dans les moments de réalisation des laboratoires (8 facettes sur 37) ou de

présentation des laboratoires (17 facettes sur 37 ; dans 5 laboratoires sur 8 : A, B, D, F et G). Elles émergent de situations expérimentales (14 facettes sur 37), de manière décontextualisée (13 facettes sur 37) ou de situations fictives (7 facettes sur 37) au sein de la phase *Investiguer* (9 facettes sur 37) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (28 facettes sur 37) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, le savoir est davantage pris en charge par les élèves (17 facettes sur 37) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (14 facettes sur 37).

Tableau 79 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 16 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation des signes de l'accélération d'un mobile en mouvement vertical ascendant dans son mouvement ascendant et dans son mouvement descendant				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	9	11	6	1	56
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	15	2	0	1	<u>83</u>

### 9.7 Résultats associés aux questions 17 et 18 du questionnaire d'enquête

La **question 17** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation et la comparaison des temps de chute de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (56 %) est supérieur à celui des élèves du groupe 1 (37 %) (**tableau 80**). Si les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de plusieurs facettes communes (celles marquées d'un astérisque), c'est de loin dans le groupe 2 que la continuité des facettes est la plus grande (**annexe 26, tableaux 28 et 29**) : la matrice du groupe 1 ne comporte que des facettes de très faible continuité alors que la matrice du groupe 2 comporte une facette de continuité moyenne et une facette de très forte continuité (celles soulignées). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_i=37$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_i=4$ ). La plus grande compréhension des élèves du groupe 2 à cette question pourrait s'expliquer par cette plus grande continuité du savoir, mais nous relevons également d'autres indicateurs microscopiques qui pourraient expliquer cet écart de performance entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont toutes

introduites dans des moments de théorisation (4 facettes sur 4). Elles émergent essentiellement de démonstrations expérimentales (3 facettes sur 4) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (4 facettes sur 4), mais elles sont en grande partie prises en charge par les élèves (3 facettes sur 4). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir sont plutôt introduites dans des moments de réalisation des laboratoires (5 facettes sur 37) ou de présentation des laboratoires (24 facettes sur 37 ; dans 4 laboratoires sur 8 : A, B, D et F). Elles émergent de situations expérimentales (11 facettes sur 37), de manière décontextualisée (13 facettes sur 37) ou de situations fictives (9 facettes sur 37) au sein de la phase *Investiguer* (5 facettes sur 37) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (32 facettes sur 37) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, le savoir est davantage pris en charge par les élèves (14 facettes sur 37) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (7 facettes sur 37).

Tableau 80 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 17 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation et comparaison des temps de chute de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	14	1	10	2	37
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	4	2	10	2	<u>56</u>

La **question 18** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question 17. Elle porte sur l'interprétation et la comparaison des vitesses de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 2 (56 %) est légèrement supérieur à celui des élèves du groupe 1 (44 %) (**tableau 81**). Soulignons qu'en sélectionnant à tort la réponse A à cette question, une part importante des élèves des deux groupes (12 élèves sur 27, 44 % des élèves pour le groupe 1 ; 5 élèves sur 18, 28 % des élèves pour le groupe 2) pensent à tort qu'une balle en chute libre qui est plus lourde atteint le sol avec une plus grande vitesse qu'une balle moins lourde. Comme c'est le cas de la question précédente, les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de plusieurs facettes communes (celles marquées d'un astérisque), c'est de loin dans le groupe 2 que la continuité des facettes est la plus grande (**annexe 26, tableaux 30 et 31**) : la matrice du groupe 1



ne comporte que deux facettes de faible continuité alors que la matrice du groupe 2 comporte deux facettes de continuité moyenne et une facette de très forte continuité (celles soulignées). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=56$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=19$ ). Une meilleure compréhension des élèves du groupe 2 à cette question pourrait s'expliquer par cette plus grande continuité du savoir, mais nous relevons également d'autres indicateurs microscopiques qui pourraient expliquer cet écart de performance entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (14 facettes sur 19), émergent de situations fictives (8 facettes sur 19), de démonstrations expérimentales (5 facettes sur 19) ou de ressources didactiques (5 facettes sur 19) en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (9 facettes sur 19), même si elles sont prises en charge en grande partie par l'enseignante (8 facettes sur 19) ou conjointement par l'enseignante et les élèves (8 facettes sur 19). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont plutôt introduites dans des moments de réalisation des laboratoires (9 facettes sur 56) ou de présentation des laboratoires (38 facettes sur 56 ; dans 5 laboratoires sur 8 : A, B, D, F et G). Elles émergent de situations expérimentales (19 facettes sur 56), de manière décontextualisée (19 facettes sur 56) ou de situations fictives (13 facettes sur 56) au sein de la phase *Investiguer* (8 facettes sur 56) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (47 facettes sur 56) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, le savoir est davantage pris en charge par les élèves (36 facettes sur 56) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (12 facettes sur 56).

Tableau 81 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 18 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation et comparaison des vitesses de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	12	2	12	1	44
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	5	2	10	1	<u>56</u>

## 9.8 Résultats associés à la question 19 du questionnaire d'enquête

La **question 19** du questionnaire d'enquête porte sur la reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile en chute libre. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves est très élevé dans les deux groupes, mais dans le groupe 2 (100 %) il est toutefois supérieur à celui du groupe 1 (81 %) (**tableau 82**). Soulignons que nous avons considéré les réponses B et D comme étant toutes deux des réponses favorables à cette question selon la prise en compte ou non du signe de la vitesse en chute libre. Si les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de quelques facettes communes (celles marquées d'un astérisque), toutes les facettes de ces matrices sont de continuité très faible, sauf une seule de continuité moyenne dans le groupe 2 (celle soulignée) (**annexe 26, tableaux 32 et 33**). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=16$ ) est légèrement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=7$ ). Une meilleure compréhension des élèves du groupe 2 à cette question pourrait s'expliquer par cette plus grande continuité du savoir, mais nous relevons également d'autres indicateurs microscopiques qui pourraient expliquer cet écart de performance entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de théorisation (4 facettes sur 7) ou de correction des exercices (3 facettes sur 7), émergent de situations fictives (3 facettes sur 7), de ressources didactiques (2 facettes sur 7) ou de démonstrations expérimentales (2 facettes sur 7), et ce, plus particulièrement en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (5 facettes sur 7). Cependant, deux facettes émergent de la phase *Conceptualiser et déployer* d'une démarche de modélisation. Sur le plan de la responsabilité du savoir, elles sont davantage prises en charge par l'enseignante (3 facettes sur 7). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont plutôt introduites dans des moments de réalisation des laboratoires (6 facettes sur 16) ou des moments de théorisation (4 facettes sur 16). Elles émergent de situations expérimentales (10 facettes sur 16) ou de situations fictives (6 facettes sur 16) au sein de la phase *Investiguer* (6 facettes sur 16) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (9 facettes sur 16) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, dans ce groupe, le savoir est davantage pris en charge conjointement par l'enseignant et les élèves (7 facettes sur 16) ou par les élèves seuls (6 facettes sur 16).

Tableau 82 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 19 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile en chute libre				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	0	19	5	3	81
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	18	0	0	<u>100</u>

### 9.9 Résultats associés aux questions 20, 21 et 22 du questionnaire d'enquête

La **question 20** du questionnaire d'enquête porte sur l'interprétation de l'évolution du mouvement (rectiligne uniforme et rectiligne uniformément accéléré) d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves est assez élevé dans les deux groupes, mais dans le groupe 2 (89 %) il est légèrement supérieur à celui du groupe 1 (78 %) (**tableau 83**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de quelques facettes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 34 et 35**). Dans le groupe 1, toutes les facettes sont de continuité très faible, alors que dans le groupe 2 nous relevons trois facettes de continuité faible (celle soulignée). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=32$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=9$ ). Une meilleure compréhension des élèves du groupe 2 à cette question pourrait s'expliquer par cette plus grande continuité du savoir, mais nous relevons également d'autres indicateurs microscopiques qui pourraient expliquer le faible écart de performance entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir ne sont pas seulement introduites dans des moments de théorisation (5 facettes sur 9), mais aussi dans la réalisation de laboratoires (4 facettes sur 9). Contrairement aux cas précédents, elles émergent davantage de situations expérimentales (5 facettes sur 9) au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* d'une démarche de modélisation et non seulement en dehors d'une telle démarche (4 facettes sur 9). Par ailleurs, elles sont davantage prises en charge par les élèves (5 facettes sur 9). Dans le groupe 2, les facettes de savoir sont essentiellement introduites dans des moments de présentation des laboratoires (24 facettes sur 32 ; dans 4 laboratoires sur 8 :

C, D, E et F), émergent de situations expérimentales (22 facettes sur 32) au sein de la phase *Investiguer* (3 facettes sur 32) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (26 facettes sur 32) de la démarche de modélisation. Par ailleurs, comme c'est le cas du groupe 1, le savoir est davantage pris en charge par les élèves (18 facettes sur 32).

Tableau 83 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 20 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation de l'évolution du mouvement (rectiligne uniforme et rectiligne uniformément accéléré) d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	2	21	0	4	78
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	16	2	0	<u>89</u>

La **question 21** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la précédente question. Elle porte sur l'interprétation de la vitesse d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves est très faible et sensiblement le même dans les deux groupes, soit 4 % pour le groupe 1 et 6 % pour le groupe 2 (**tableau 84**). Les matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont les mêmes que celles présentées à la question 20 (**annexe 26, tableaux 34 et 35**). En sélectionnant à tort la réponse C à cette question, une part importante des élèves des deux groupes (22 élèves sur 27, 81 % des élèves pour le groupe 1 ; 14 élèves sur 18, 78 % des élèves pour le groupe 2) pensent à tort que dans ce système de plans inclinés, la vitesse de la bille au point B est plus grande que la vitesse de la bille au point F, mais qu'elle est plus petite que celle au point D, alors que la vitesse de la bille au point B est plus grande que la vitesse de la bille au point F, mais qu'elle est plus petite que celle au point D. Nous postulons que ce taux de réussite très bas dans les deux groupes est dû à la grande complexité de la situation qui n'a pas été abordée dans l'une ou l'autre des deux classes.

Tableau 84 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 21 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation de la vitesse d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	1	2	22	2	4
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	1	2	14	1	<u>6</u>

La **question 22** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la précédente question. Elle porte sur la reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile, entre deux positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves du groupe 1 (62 %) est nettement supérieur à celui des élèves du groupe 2 (39 %) (**tableau 85**). En sélectionnant à tort la réponse A à cette question, une part importante des élèves du groupe 2 (8 élèves sur 18, 44 % des élèves) pensent à tort que le tracé d'un graphique vitesse-temps d'un mobile en MRUA est une parabole plutôt qu'une droite oblique, et par conséquent, ces derniers confondent le tracé d'un graphique position-temps avec celui d'un graphique vitesse-temps. Les deux matrices des facettes de savoir simplifiées associées à chacun des groupes sont composées de facettes communes (celles marquées d'un astérisque) (**annexe 26, tableaux 36 et 37**). Dans le groupe 2, le nombre de facettes est plus important que dans le groupe 1. Nous y relevons également quatre facettes de faible continuité et deux facettes de continuité moyenne alors que toutes les facettes du groupe 1 sont de très faible continuité sauf pour une d'entre elles qui est de faible continuité (celles soulignées). En outre, la fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice du groupe 2 ( $F_t=46$ ) est nettement supérieure à celle du groupe 1 ( $F_t=21$ ). Il importe alors d'explorer les autres indicateurs microscopiques afin de voir ce qui peut expliquer cet écart de réussite entre les deux groupes. Dans le groupe 1, les facettes de savoir sont toutes introduites dans des moments de théorisation (21 facettes sur 21). Elles émergent essentiellement de situations fictives (17 facettes sur 21) et dans une moindre proportion de manière décontextualisée (4 facettes sur 21), et ce, en dehors d'une démarche de modélisation quelconque (21 facettes sur 21). Quant à leur prise en charge, elle se fait davantage sous la responsabilité de l'enseignante (12 facettes sur 21) ou conjointement par l'enseignante et les élèves (6 facettes sur 21). Dans le groupe 2, la configuration est toute autre : les facettes de savoir ne sont

pas seulement introduites dans les moments de théorisation (12 facettes sur 46), mais aussi dans les moments de réalisation des laboratoires (10 facettes sur 46) ou de présentation des laboratoires (22 facettes sur 46 ; dans 6 laboratoires sur 8 : A, B, D, E, F et G). Elles émergent de situations expérimentales (29 facettes sur 46) ou de situations fictives (14 facettes sur 46) au sein de la phase *Investiguer* (8 facettes sur 46) ou *Conceptualiser et déployer* (31 facettes sur 46) de la démarche de modélisation. Quant à leur prise en charge, elle se fait davantage sous la responsabilité des élèves (20 facettes sur 21) ou conjointement par l'enseignant et les élèves (16 facettes sur 21). Ces résultats indiquent que le pourcentage de réussite plus élevé chez les élèves du groupe 1 pourrait être attribué à la qualité des situations fictives présentées aux élèves et à leur systématisation dans cette séquence d'enseignement.

Tableau 85 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 22 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile, entre deux positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	4	4	16	2	<u>62</u>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	8	1	7	2	39

### 9.10 Résultats associés à la question 23 du questionnaire d'enquête

La **question 23** du questionnaire d'enquête porte sur la reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle. Pour cette question, le pourcentage de réussite des élèves des deux groupes est relativement faible : il est de 44 % pour le groupe 1 et il est de 33 % pour le groupe 2 (**tableau 86**). En sélectionnant à tort la réponse B à cette question, une part importante des élèves des deux groupes (8 élèves sur 27 pour le groupe 1, 30 % des élèves ; 10 élèves sur 18 pour le groupe 2, 56 % des élèves) pense à tort que la trajectoire d'une balle qu'un coureur courant à une vitesse constante de 15 km/h laisse tomber à la verticale sans exercer aucune poussée dans une direction quelconque est équivalente à celle de la chute libre verticale. En d'autres mots, au moment de sa chute, les élèves ne considèrent pas la vitesse

horizontale de la balle comme étant une propulsion en soi. La matrice des facettes de savoir simplifiée associée au groupe 2<sup>113</sup> est composée de trois facettes (**annexe 26, tableau 38**). Les facettes de cette matrice sont toutes de très faible continuité et une seule est de continuité moyenne (celle soulignée). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice de ce groupe est de 19. Elles sont introduites en grande partie dans les moments de présentation des laboratoires (11 facettes sur 19), mais dans seulement 3 laboratoires sur 8, soit dans les laboratoires B, C et G. Elles émergent de situations expérimentales (6 facettes sur 19), de situations fictives (5 facettes sur 19) ou de manière décontextualisée (5 facettes sur 9) notamment au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (15 facettes sur 19) de la démarche de modélisation. Quant à leur prise en charge, elle se fait davantage sous la responsabilité des élèves (13 facettes sur 19). Nous expliquons la faible performance des élèves du groupe 2 à cette question par la complexité du mouvement balistique, plus précisément le contexte original de traitement du mouvement balistique : dans cet évènement, le projectile est lancé par un mobile en mouvement alors que le mouvement balistique a été traité en classe dans le contexte du lancement de projectile à partir d'un propulseur.

Tableau 86 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 23 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	3	8	4	12	<u>44</u>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	1	10	1	6	33

---

<sup>113</sup> Soulignons que comme nous n'avons pas enregistré la suite de la séquence d'enseignement de l'enseignante du groupe 1 qui a porté sur le mouvement balistique, nous n'avons pas pu construire la matrice des facettes savoir associée à ce groupe d'élèves. En conséquence, nous ne pouvons établir une analyse comparative des performances de élèves.

### 9.11 Résultats associés aux questions 24, 25 et 26 du questionnaire d'enquête

La **question 24** du questionnaire d'enquête porte sur la reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle. Si cette question porte sur le même contenu disciplinaire, le pourcentage de réussite est beaucoup plus élevé et sensiblement le même pour les deux groupes d'élèves : il est de 70 % pour le groupe 1 et il est de 67 % pour le groupe 2 (**tableau 87**). En sélectionnant à tort la réponse D à cette question, une part importante des élèves des deux groupes (6 élèves sur 27 pour le groupe 1, 22 % des élèves ; 4 élèves sur 18 pour le groupe 2, 22 % des élèves) pense à tort que la trajectoire d'une rondelle de hockey qui est lancée avec une vitesse horizontale  $\vec{v}_0$  non nulle du bord Q du toit d'un immeuble de deux étages est composée de deux parties : une trajectoire parabolique suivie d'une chute libre. Nous considérons que la matrice des facettes de savoir simplifiée associée au groupe 2 est la même que la matrice présentée dans la question précédente (**annexe 26, tableau 38**). Nous expliquons la bonne performance des élèves du groupe 2 par la fréquence d'apparition totale des facettes qui est relativement élevée, et plus particulièrement par la continuité moyenne de la première facette de cette matrice. Par ailleurs, l'évènement retenu, celui du lancer d'une rondelle de hockey s'apparente aux évènements retenus en classe pour traiter du mouvement balistique.

Tableau 87 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 24 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	1	1	19	6	<b>70</b>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	1	1	12	4	67

La **question 25** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur l'interprétation des composantes de la vitesse d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle. Comme c'est le cas de la question 23, le pourcentage de réussite des élèves des deux groupes est relativement faible et sensiblement le même pour les deux groupes d'élèves : il est de 22 % pour le groupe 1 et il est de 17 % pour le



groupe 2 (**tableau 88**). En sélectionnant à tort la réponse C à cette question, une part importante des élèves des deux groupes (9 élèves sur 27 pour le groupe 1, 33 % des élèves ; 13 élèves sur 18 pour le groupe 2, 72 % des élèves) pense à tort que la composante horizontale de la vitesse de la rondelle diminue continuellement tout le long du vol. En d'autres mots, plusieurs élèves ne prennent pas en considération que la résistance de l'air est négligeable pour cet événement. La matrice des facettes de savoir simplifiée associée au groupe 2<sup>114</sup> est composée de sept facettes dont deux sont de faible continuité et une de continuité moyenne (celles soulignées) (**annexe 26, tableau 38**). La fréquence d'apparition totale des facettes de la matrice de ce groupe est de 32. Les facettes de cette matrice sont introduites en grande partie dans un moment de présentation des laboratoires (27 facettes sur 32), et plus particulièrement dans la présentation d'un seul laboratoire sur les huit, soit le laboratoire G. Elles émergent en grande partie de situations fictives (14 facettes sur 19) ou de manière décontextualisée (10 facettes sur 32) et dans une moindre proportion de situations expérimentales (6 facettes sur 32). Elles sont toutes introduites au sein de la phase *Conceptualiser et déployer* (32 facettes sur 32) de la démarche de modélisation. Quant à leur prise en charge, elle se fait davantage sous la responsabilité des élèves (26 facettes sur 32). Nous expliquons la faible performance des élèves du groupe 2 à cette question par la complexité du mouvement balistique, et ce, d'autant plus que les facettes de cette matrice ont été construites que par un groupe restreint d'élèves et introduites lors d'une seule séance au moment de la présentation du laboratoire G.

Tableau 88 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 25 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Interprétation des composantes de la vitesse d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle				
Choix de réponse	A	<b>B</b>	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	5	<b>6</b>	9	7	<b>22</b>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	1	<b>4</b>	13	1	17

<sup>114</sup> Soulignons que comme nous n'avons pas enregistré la suite de la séquence d'enseignement de l'enseignante du groupe 1 qui a porté sur le mouvement balistique, nous n'avons pas pu construire la matrice des facettes savoir associée à ce groupe d'élèves. En conséquence, nous ne pouvons établir une analyse comparative des performances de élèves.

La **question 26** du questionnaire d'enquête s'inscrit dans la continuité de la question précédente. Elle porte sur la comparaison des temps de chute au sol d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale nulle et d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale non nulle. Pour cette question, nous constatons un écart important sur le pourcentage de réussite des élèves entre les deux groupes : il est moyen pour le groupe 1 (74 %) et relativement faible pour le groupe 2 (44 %) (**tableau 89**). Soulignons que comme nous n'avons pas enregistré la suite de la séquence d'enseignement de l'enseignante du groupe 1 qui a porté sur le mouvement balistique, nous ne pouvons effectuer une analyse de la performance des élèves de ce groupe et encore moins effectuer une analyse comparative des performances des deux groupes élèves. Cependant, nous n'avons repéré aucune facette de savoir en lien avec cette question dans le groupe 2, ce qui pourrait expliquer la faible performance des élèves dans le groupe 2.

Tableau 89 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 26 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Comparaison des temps de chute au sol d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale nulle et d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale non nulle				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	5	1	20	1	<u>74</u>
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	7	1	8	2	44

### 9.12 Résultats associés à la question 27 du questionnaire d'enquête

La **question 27** du questionnaire d'enquête porte sur la description des paramètres (force de propulsion et angle de tir) de lancement d'un projectile en vue d'obtenir une plus grande portée. Pour cette question, nous constatons un écart important sur le pourcentage de réussite des élèves entre les deux groupes : il est très faible pour le groupe 1 (48 %) et très fort pour le groupe 2 (94 %) (**tableau 90**). En sélectionnant à tort les réponses B ou C à cette question, une part importante des élèves du groupe 1 (12 élèves sur 27 pour le groupe 1, 44 % des élèves) pense que l'ajustement d'un angle de tir à 30° ou à 60° avec le maintien d'une force de propulsion moyenne permet de

lancer le projectile plus loin, alors que dans un mouvement balistique la portée d'un projectile est maximale lorsque son angle de tir est à 45 degrés. Comme nous l'avons expliqué précédemment, si nous ne pouvons effectuer une analyse de la performance des élèves du groupe 1 et encore moins une analyse comparative des performances des deux groupes élèves, nous pouvons toutefois mettre en relation la pratique d'enseignement avec la performance des élèves pour le groupe 2. La matrice des facettes de savoir simplifiée associée au groupe 2 est composée d'une seule facette de continuité faible avec une fréquence d'apparition totale de 7 (celle soulignée) ([annexe 26, tableau 40](#)). Cette facette est essentiellement introduite dans les moments de réalisation du laboratoire G (2 facettes sur 7) ou de présentation du laboratoire G (4 facettes sur 7), émergent de situations expérimentales (5 facettes sur 7) au sein de la phase *Investiguer* (2 facettes sur 7) ou de la phase *Conceptualiser et déployer* (5 facettes sur 7) de la démarche de modélisation. Quant à sa prise en charge, elle est davantage sous la responsabilité des élèves (5 facettes sur 7). Nous expliquons la forte performance des élèves du groupe 2 à cette question par la mise en évidence de la facette « C- Dans un mouvement balistique, la portée d'un projectile est maximale lorsque son angle de tir est à 45° » à plusieurs reprises dans la présentation du laboratoire G.

Tableau 90 : Comparaison de la distribution des réponses et du pourcentage de réussite des élèves à la question 27 du questionnaire d'enquête

Contenus disciplinaires	Description des paramètres (force de propulsion et angle de tir) de lancement d'un projectile en vue d'obtenir une plus grande portée				
Choix de réponse	A	B	C	D	Pourcentage de réussite
Groupe d'élèves de l'enseignante 1	2	7	5	13	48
Groupe d'élèves de l'enseignant 2	0	1	0	17	<u>94</u>

## **SIXIÈME CHAPITRE : SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**

### **1. SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION CONCEPTUELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS**

#### **1.1 Quelles significations attribuées au concept de modèle en sciences par les enseignants ?**

Les conceptions des deux enseignants en regard de la notion de modèle en sciences convergent en ce qui concerne certaines caractéristiques retenues dans notre cadrage conceptuel, mais divergent sur d'autres. Alors qu'ils partagent tous les deux l'idée que les modèles sont des représentations simplifiées d'une entité du monde réel, et qu'ils peuvent être représentés par une grande diversité de registres de représentation sémiotique, le modèle comme représentation non unique des phénomènes n'a été évoqué que chez l'enseignante 1, et le modèle comme outil de pensée intermédiaire entre deux mondes pour la représentation, la description, l'explication et la prédiction des phénomènes n'a été évoqué que chez l'enseignant 2. Lorsque les enseignants font référence aux modèles, leur discours est fortement marqué par l'idée que les modèles puissent s'exprimer à travers les registres algébrique, graphique et vectoriel. Cependant, l'idée de complémentarité entre les registres de représentation sémiotique est accentuée chez l'enseignant 2. Dans la « phase de modélisation extrêmement mathématique » de la démarche de modélisation pour l'étude de divers phénomènes, l'enseignant 2 stipule que les élèves sont appelés à construire des modèles du mouvement en mobilisant des représentations tabulaires, algébriques et graphiques. Ces représentations sont nécessaires pour la construction des règles et diagrammes distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps du mouvement des objets matériels, en plus des représentations vectorielles pour la description des systèmes de forces qui agissent sur ces objets. Or, la compréhension des phénomènes par les élèves est d'autant plus facilitée si des représentations multiples des modèles sont mobilisées et articulées (Adadan, Irving et Trundle, 2009 ; Ainsworth, 2008 ; Bécu-Robinault, 2005 ; Oh et Oh, 2012 ; Tsui et Treagust, 2003). À ce sujet, Bécu-Robinault (2005, p. 57) dit que « tous les modèles de la physique, scientifiques ou scolaires, s'appuient sur des représentations » et fait le postulat que les élèves donnent du sens aux modèles en s'appropriant et en articulant divers registres de représentation des concepts lors de la modélisation d'un

phénomène. Dans le même sens, Dori et Belcher (2005) relèvent que les processus de modélisation favorisant davantage la compréhension conceptuelle des élèves sont ceux visant l'utilisation, l'adaptation, la révision ou la construction des modèles en mobilisant une grande diversité de registres de représentation sémiotique.

Si l'enseignante 1 est la seule à souligner l'importance de recourir à plus d'un modèle pour étudier un même phénomène, sa justification est de nature pédagogique (par l'idée de différenciation pédagogique) et non de nature épistémique (par l'idée de complémentarité des modèles). Comme le souligne Halloun (2004), tout modèle présente des limites par rapport à son référent et des modèles différents sont nécessaires afin de fournir une explication plus complète de ce référent. Si la non-unicité du modèle est associée à la mobilisation de plusieurs modèles pour un même phénomène, elle inclut aussi l'idée qu'un même modèle peut représenter plusieurs phénomènes (Robardet et Guillaud, 1997), ce qui n'a pas été relevé chez cette enseignante. En cinématique, le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) permet à la fois d'interpréter le mouvement d'objets matériels en chute libre ou sur des plans inclinés ascendant et descendant.

Mais la caractéristique des modèles que nous considérons la plus fondamentale, celle d'outil de pensée intermédiaire entre les phénomènes et les théories (Bachelard, 1979 ; Bunge, 1975 ; Tiberghien, 1994 ; Walliser, 1977) n'a été relevée que chez l'enseignant 2. Celui-ci a évoqué à plusieurs reprises que le modèle en physique constitue un intermédiaire entre le concret de l'expérience et l'abstrait de la théorie mathématique. Pour cet enseignant, les modèles du mouvement rectiligne uniforme, du mouvement rectiligne uniformément accéléré, du mouvement balistique et du mouvement pendulaire que les élèves sont appelés à construire au sein de leur laboratoire sont issus de relations entre « des données de la physique » (données expérimentales relevant des phénomènes physiques) et « des données mathématiques théoriques » (données relevant des modèles mathématiques existants). Cet enseignant énonce deux phases essentielles pour la construction d'un modèle : 1) une première phase qu'il qualifie de « phase extrêmement mathématique » dans laquelle ceux-ci mobilisent les outils mathématiques nécessaires à la modélisation de leur phénomène en vue de construire les équations mathématiques (distance-temps, vitesse-temps, accélération-temps, etc.) du phénomène, et que nous pourrions associer à la

*phase inductive* du processus de modélisation (celle allant du champ empirique vers le champ théorique) (Walliser, 1977) ; 2) une seconde phase qu'il qualifie de « phase analytique » consistant à comparer les résultats obtenus (les modèles construits sur la base des données expérimentales) avec les résultats attendus ou les modèles existants et formalisés sur ces mêmes phénomènes, que nous pourrions associer à la *phase déductive* du processus de modélisation (celle allant du champ théorique vers le champ empirique) (Walliser, 1977). La conception du modèle en sciences véhiculée par cet enseignant rejoint d'assez près celle de Bachelard (1979, p. 8) pour qui le modèle est un intermédiaire entre le concret de l'expérience et l'abstrait de la théorie : « Le modèle dans son acceptation la plus abstraite, fonctionne d'une manière ostensive, et le modèle, dans son acceptation la plus concrète de modèle visualisable, laisse transparaître la dominante théorique » (*Ibid*, p. 8), et celle d'Hestenes (1992) qui, en se basant sur Bunge (1983), accorde une priorité à la structure mathématique des modèles et leur subordination à la théorie en expliquant que les modèles sont d'autant plus valides si leur construction se fait en cohérence avec les données et résultats issus des expériences de référence, d'une part, et s'ils permettent à leur tour de confirmer la théorie au sein de laquelle ils sont construits, d'autre part.

L'analyse du discours de l'enseignante 1 nous a permis de relever deux confusions importantes du concept de modèle avec d'autres concepts didactiques. La première confusion se réfère à l'appréhension de la démarche scientifique et de la démarche de résolution de problèmes d'application en tant que modèles en sciences. La seconde se réfère à la confusion entre modèle et registre de représentation sémiotique. Pour elle, les formules, les équations mathématiques ainsi que les vecteurs correspondent à des modèles. Si elle fait un usage des représentations multiples dans son enseignement des modèles, elle confond, comme le font plusieurs enseignants, le modèle avec les modes de représentation utilisés pour exprimer le modèle (Larcher, 1994 ; Sanchez, 2008).

Soulignons enfin que certaines caractéristiques importantes des modèles en sciences sont absentes du discours des deux enseignants. La dimension inachevée et itérative des modèles dans leur construction est absente du discours des deux enseignants, alors que dans la communauté scientifique, leur construction s'inscrit dans un processus continu d'évaluation et d'adaptation et de remplacement en cohérence avec la progression des connaissances scientifiques (Clement et Rea-Ramirez, 2008 ; Gilbert *et al.*, 2000 ; Halloun, 2004). Nous pensons que cette finalité n'a pas

été évoquée en raison du temps restreint à disposition pour couvrir la thématique de la cinématique. Par ailleurs, sur le plan des fonctions des modèles, les fonctions de représentation et d'explication des phénomènes y sont rapportées fréquemment chez les deux enseignants : les modèles sont pour eux des outils favorisant la visualisation et la compréhension des élèves en regard des phénomènes étudiés. La fonction euristique (le modèle en tant qu'un outil d'exploration des phénomènes) et la fonction prédictive des modèles sont cependant absentes de leur discours. Ces résultats rejoignent ceux de plusieurs études antérieures qui font état de cette conception réductrice des fonctions des modèles chez la plupart des futurs enseignants ou des enseignants de sciences du secondaire (Justi et Gilbert, 2002b ; Smit et Finegold, 1995 ; Van Driel et Verloop, 1999 ; Roy et Hasni, 2014).

La compréhension du concept de modèle est partielle chez les deux enseignants, mais elle demeure toutefois plus élevée chez l'enseignant 2. Cette conception partielle du concept de modèle en sciences se retrouve dans les matériels didactiques de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (Bensaada et Ouellette, 2010 ; Champagne, Séguin, et Cossette, 2017a, 2017b) utilisés par les deux enseignants. Si les guides d'enseignement et les manuels de l'élève de ces matériels privilégient l'acquisition de connaissances sur la pratique de la modélisation, ils sont marqués par une absence de réflexion d'ordre épistémologique sur les modèles et la modélisation. Au moment d'effectuer les analyses de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1, nous avons constaté une absence totale de référence à la notion de modèle dans les chapitres thématiques dédiés au mouvement rectiligne uniforme, au mouvement rectiligne uniformément accéléré et au mouvement des projectiles du matériel *Option science-Physique de 5<sup>e</sup> secondaire* (Champagne, Séguin, et Cossette, 2017a, 2017b) utilisé dans la classe de cette enseignante. Cette problématique pourrait s'expliquer par le fait que le Programme de formation de l'école québécoise (PFEQ) ne met pas en avant la nécessité de développer des connaissances d'ordre épistémologique chez les élèves. En raison de son importance pour l'éducation scientifique, cette composante devrait être intégrée dans les matériels didactiques et faire partie des dispositifs de formation initiale et continue des enseignants du secondaire.

Les activités proposées dans ce matériel mettant fortement en avant l'utilité des représentations sémiotiques (schéma, formules mathématiques, graphiques, etc.) pour décrire les mouvements des objets matériels, nous faisons l'hypothèse que les conceptions de cette

enseignante sur la notion de modèle sont fortement influencées par celles véhiculées dans le matériel didactique qu'elle utilise<sup>115</sup>. Considérant que les conceptions des enseignants sur la nature des savoirs disciplinaires, en l'occurrence ici les modèles et la démarche de modélisation, peuvent avoir une influence importante sur leurs pratiques de classe (Hsu et Roth, 2009), ces constats retiennent notre attention. Le degré de pertinence des modèles construits par les élèves pour étudier des phénomènes étant positivement corrélé à leur compréhension de la nature des modèles (Gobert et Discenna, 1997 ; Schwarz et White, 1999), nous sommes d'avis avec Danusso, Testa et Vicentini (2010, p. 872) que les enseignants doivent avoir une solide compréhension de la nature des modèles en sciences : « En d'autres termes, les enseignants devraient être conscients du rôle des modèles dans le processus de construction des savoirs scientifiques et de la modélisation comme support essentiel à la compréhension conceptuelle des concepts scientifiques. ». Les matériels didactiques n'aidant pas l'enseignant et les élèves à se forger une compréhension épistémologique de la notion de modèle, il y a nécessité de prendre une distanciation critique par rapport à ceux-ci. Ces différences de compréhension sur la notion de modèle semblent avoir un effet important sur les pratiques de classe.

## **1.2 Quelles significations attribuées à la démarche de modélisation par les enseignants ?**

Les significations attribuées à la démarche de modélisation par les deux enseignants se distinguent nettement. L'enseignante 1 conçoit la démarche de modélisation dans trois contextes distincts. Dans le premier contexte, cette démarche est confondue avec une démarche de résolution de problèmes d'application en cinq étapes (identifier des données pertinentes, identifier une donnée recherchée, sélectionner une formule mathématique, appliquer la formule et trouver une réponse) mises en œuvre dans les moments de réalisation ou de correction d'exercices en équipe ou grand groupe pendant une partie importante de la séquence d'enseignement (un peu plus de 30 % du temps total). Dans le second contexte, la démarche de modélisation est confondue avec une démarche d'analyse et de construction de graphiques et de formules mathématiques. Cette

---

<sup>115</sup> Une analyse plus fine de la pratique d'enseignement de cette enseignante quant à son usage du matériel didactique permettrait de confirmer cette hypothèse.



démarche consiste à construire, en groupe-classe, les règles algébriques et les représentations graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'objets matériels suivant différents modèles du mouvement (MRU, MRUA, etc.) dans la cadre de situations fictives ou de démonstrations expérimentales prises essentiellement en charge par l'enseignante. Dans le troisième contexte, qui se rapproche davantage du sens que nous attribuons à la démarche de modélisation, celle-ci correspond à une démarche expérimentale. L'exemple qu'elle fournit pour illustrer cette démarche est le laboratoire qui porte sur la dynamique (*La souque à la corde scientifique*) dans lequel les élèves sont appelés à modéliser un système de forces (lesquelles représentent les actions de personnes qui tirent sur un anneau) en recherchant expérimentalement et théoriquement l'équilibre de ce système avec un vecteur équilibrant. Le laboratoire qui porte sur la cinématique *Une descente en planche à neige* n'est pas cité à titre d'exemple de démarche de modélisation, même s'il sollicite de la part des élèves la construction de représentations graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'un charriot qui dévale un plan incliné descendant. Dans ce laboratoire, la phase *Problématiser* est réduite à la lecture d'une mise en situation et la phase *Planifier* est absente, car le protocole est entièrement donné aux élèves. En clair, les moments de la séquence d'enseignement où il y a véritablement démarche de modélisation ne sont pas identifiés par cette enseignante.

Contrairement à l'enseignante 1, l'enseignant 2 conçoit la démarche de modélisation comme un processus itératif amorcé par une phase de problématisation et qui se clôture par une phase de conceptualisation et de déploiement du modèle. Pour cet enseignant, la démarche de modélisation n'est pas mise en œuvre dans des contextes isolés, mais de manière continue sur l'ensemble de la séquence d'enseignement. Les tâches des élèves rapportées par l'enseignant dans les entrevues pré et postenregistrement montrent que les élèves sont fortement engagés dans les quatre phases de cette démarche : 1) *Problématiser* en s'appropriant une situation empirique en lien avec un phénomène de la physique et le fonctionnement de matériels de laboratoire par diverses manipulations exploratoires ; 2) *Planifier* en concevant un protocole de laboratoire qui comporte une liste de matériel, des buts à atteindre, des facteurs expérimentaux à explorer et des hypothèses explicatives relatives au phénomène à l'étude, d'une part, et en formulant des hypothèses explicatives sur le comportement d'un phénomène, d'autre part ; 3) *Investiguer* en recueillant des données expérimentales à l'aide d'outils et d'instruments de mesure à disposition, en calculant des

grandeurs physiques de position, de distance, de vitesse et d'accélération, en construisant des représentations algébriques et graphiques distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps de ces données expérimentales en s'appuyant sur des registres de représentation sémiotique divers, et en décrivant les effets de facteurs expérimentaux retenus ; 4) *Conceptualiser et déployer* en présentant les objectifs et conditions de réalisation expérimentales des laboratoires (buts, facteurs expérimentés, hypothèses explicatives initiales, etc.), en décrivant le comportement du phénomène étudié, le(s) modèle(s) physique sous-jacent(s) (MRU, MRUA, MB ou MP) et l'influence ou non des facteurs expérimentaux, en comparant les écarts entre le modèle expérimental (construit sur la base des données expérimentales) avec le modèle théorique (le modèle reconnu par la communauté scientifique), en proposant des pistes d'amélioration du protocole et en appliquant le modèle construit dans de nouveaux contextes au moyen de la résolution de problèmes d'application.

La description des tâches prises en charge par l'enseignant et les élèves au sein des démarches de modélisation mises en œuvre dans la classe de l'enseignant 2 permet d'affirmer que les élèves sont bien engagés à différents moments de la séquence dans l'une ou l'autre des phases d'une démarche de modélisation constructiviste telle que nous la concevons. Toutefois, des écarts peuvent néanmoins être soulignés entre la démarche proposée par cet enseignant et celle retenue dans le cadre conceptuel. Dans la phase *Problématiser*, l'enseignant ne propose pas aux élèves une problématique empirique qui présente une pertinence sociale au sens de Fabre (1999), c'est-à-dire une situation qui permet d'étudier des phénomènes de la physique qui ont du sens avec l'expérience quotidienne des élèves. Les situations empiriques proposées sont des laboratoires emblématiques de l'enseignement de la physique et ne sont centrées que sur des enjeux disciplinaires. Cependant, nous considérons que ces situations sont pertinentes sur le plan épistémologique, car elles prennent ancrage dans des savoirs disciplinaires de la physique et conduisent à des apprentissages disciplinaires pertinents, valides et exacts dans ce domaine. De même, ces situations sont pertinentes sur le plan psychologique, car elles prennent appui sur les connaissances initiales des élèves (Hasni, Roy, Franc et Dumais, 2011) et permettent d'engager les élèves dans des problèmes qui deviennent les leurs au cours de la phase de problématisation (Brousseau, Balacheff, Cooper et Sutherland, 1998 ; Fabre, 1999). Dans la phase *Problématiser*, les élèves ont eu l'occasion d'identifier des facteurs expérimentaux à explorer, de formuler des questions fécondes à investiguer en lien avec le contrôle de ces facteurs, ainsi que des modèles explicatifs hypothétiques

initiaux sur le comportement des phénomènes étudiés. Dans la phase *Planifier*, les élèves ont été appelés à concevoir en équipe un scénario d'investigation leur permettant de valider leur modèle explicatif hypothétique, même si celui-ci n'a pas fait l'objet d'une validation au sein d'un débat argumenté. Dans la phase *Investiguer*, la formalisation du modèle explicatif hypothétique proposée dans la phase de problématisation a bien eu lieu par une mise en relation des données recueillies expérimentalement avec les concepts disciplinaires de la physique et des mathématiques, et ce, en recourant à différents registres de représentation sémiotique. Par ailleurs, la multiplicité des recueils de données effectués a permis une évaluation empirique du modèle en vue de le reconfigurer ou de le rejeter, et de construire un modèle confirmé du mouvement étudié. Quant au débat argumenté sur la qualité et la pertinence des modélisations proposées par les élèves, celui-ci a eu lieu lors de la présentation des laboratoires. Dans la phase *Conceptualiser et déployer*, les élèves se sont appuyés sur leur modèle confirmé afin de décrire le comportement du phénomène et de formuler plusieurs énoncés scientifiques sur la distance, la vitesse et l'accélération d'un objet matériel en mouvement dans un système. Quant au déploiement du modèle, celui-ci ne s'est pas fait dans de nouvelles situations empiriques, mais plutôt dans le cadre de situations fictives proposées dans le manuel scolaire sous la forme de problèmes d'application à résoudre en lien avec les modèles développés. Cependant, pour le laboratoire sur le mouvement balistique, les élèves se sont appuyés sur le modèle du mouvement rectiligne uniforme (table à coussin d'air) et le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (mouvement en chute libre, mouvement vertical ascendant et mouvement sur des plans inclinés) pour extrapoler le mouvement balistique comme composition de ces deux mouvements. Enfin, nous n'avons pas relevé la dimension cyclique ou itérative de la démarche de modélisation dans le discours de l'enseignant 2, en ce sens qu'au terme d'une telle démarche les élèves sont en mesure de formuler de nouveaux questionnements à la lumière des résultats obtenus et reconduire le cycle de modélisation. Comme c'est le cas pour le concept de modèle, ces constats font état d'une conception partielle du concept de démarche de modélisation chez les deux enseignants, et plus particulièrement chez l'enseignante 1.

## 2. SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION FONCTIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS

L'analyse du discours des deux enseignants montre que les justifications de recourir à un enseignement de modèles et de la modélisation se distinguent nettement. L'enseignante 1 évoque deux justifications retenues dans notre problématique : le développement d'une compréhension de certains phénomènes physiques complexes et l'acquisition ou la mobilisation des savoirs procéduraux (processus de modélisation et de résolution de problèmes). Pour elle, il est utile que les élèves recourent aux modèles et à la démarche de modélisation en physique parce que cela leur permet de manipuler, visualiser et comprendre des concepts et des phénomènes de la physique. Elle souligne que l'apprentissage des modèles de la physique doit permettre aux élèves de comprendre des mouvements simples impliqués de leur environnement immédiat. Quant à l'acquisition et la mobilisation des savoirs procéduraux, elle pointe du doigt l'importance de développer chez ses élèves leur habileté à analyser des représentations graphiques, à mettre en œuvre une démarche ou une méthode scientifique, ou encore à recourir à des processus de résolution de problèmes en sciences. L'acquisition de ces habiletés est centrale pour la réussite des futurs cours de sciences aux études supérieures.

Quant à l'enseignant 2, la plupart des justifications évoquées la problématique sont rapportées dans son discours. Plus précisément, quatre d'entre elles sont fortement rapportées, avec une très grande fréquence d'apparition : entre 15 et 25 fois. La première est la compréhension et la conceptualisation d'une large gamme de phénomènes de la physique. Cette finalité s'accompagne d'une grande responsabilité accordée aux élèves en leur demandant de devenir des « spécialistes de leur thématique » de manière à ce qu'ils puissent transmettre leurs savoirs aux autres élèves de la classe. Plutôt que de proposer un ou deux laboratoires de cinématique communs à tous les élèves comme c'est le cas chez l'enseignante 1, cet enseignant engage la classe dans un projet coopératif comportant huit laboratoires dont les mouvements d'objets matériels peuvent être décrits par l'un ou l'autre des quatre modèles suivants : mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré, mouvement balistique et mouvement pendulaire. Ce faisant, il donne l'opportunité aux élèves de se construire un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique par l'investigation de plusieurs situations expérimentales touchant un même

modèle du mouvement et par des analyses comparatives de situations expérimentales mettant en jeu différents modèles du mouvement afin de dégager leurs similitudes et leurs spécificités. En outre, les attentes de la part de cet enseignant envers les élèves sont clairement formulées quant à la nécessité de maîtriser non seulement les bases théoriques sous-jacentes au mouvement étudié, mais aussi le volet expérimental dans lequel se réalisent les expérimentations qui se doivent d'être soigneusement planifiées. À ce sujet, à plusieurs moments de la séquence d'enseignement, l'enseignant 2 rappelle aux élèves l'importance de mettre en relation le volet expérimental et le volet théorique afin de mieux comprendre le comportement des phénomènes. Ces propos sont en cohérence avec l'idée qu'une véritable compréhension des phénomènes en sciences n'est possible que par une mise en relation entre le monde des objets et événements et le monde des théories et des modèles (Martinand, 1996, Orange, 1997, Tiberghien, 1994).

La seconde justification concerne la mobilisation et la construction des savoirs conceptuels (concepts, modèles, lois, etc.). Au moment de s'engager dans leur laboratoire, les élèves possédaient déjà les connaissances initiales nécessaires à la compréhension des problématiques qui leur étaient proposées. En effet, les concepts de force (forces résistante et équilibrante) et de vecteur ainsi que la loi de Hooke ont été introduits au début de l'année scolaire dans l'étude des situations impliquant le mouvement d'objets matériels sur des systèmes compressés. Aussi, la majorité des modèles mathématiques avaient été préalablement introduits dans des cours antérieurs de physique portant sur la dynamique ou l'optique ou dans des cours antérieurs de mathématique ou de chimie. Par conséquent, l'engagement des élèves dans ce projet collaboratif leur a permis de poursuivre la construction des modèles préalablement vus en les mobilisant dans de nouvelles situations empiriques portant sur la cinématique et la dynamique. Par ailleurs, l'étude de ces nouveaux phénomènes de la physique leur a également permis de construire de nouveaux concepts comme ceux de distance, de vitesse et d'accélération et de nouveaux modèles comme le modèle du mouvement rectiligne uniforme (MRU), le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) et le modèle du mouvement balistique (MB). Une attention particulière a été portée par l'enseignant 2 quant à la prise en compte de l'état des connaissances de ses élèves sur le sujet, ce qui de notre point de vue a favorisé le processus de problématisation dans la démarche de modélisation. Comme nous l'avons soulevé dans le cadre conceptuel, aucun problème scientifique « ne peut naître spontanément d'un contact immédiat avec une situation, même soigneusement

choisie. Celui-ci ne peut pas émerger d'un vide conceptuel » (Hasni *et al.*, 2011, p. 9). Ces propos rejoignent également ceux de Chomat *et al.* (1992), qui mettent en évidence l'établissement d'une relation circulaire entre la conceptualisation et la modélisation en affirmant que la modélisation de tout phénomène physique nécessite la mobilisation de concepts construits antérieurement et que l'élaboration conceptuelle ne peut avoir lieu que s'il y a des points d'appui possibles.

La troisième justification concerne la mobilisation ou la construction de savoirs procéduraux (habiletés d'investigation scientifique, méthode scientifique, etc.). Concernant cette finalité éducative, c'est la démarche de modélisation qui est particulièrement visée par l'enseignant 2. Pour lui, c'est en appliquant strictement cette méthode de recherche scientifique que les élèves ont la possibilité de construire de nouveaux savoirs procéduraux par exemple concevoir un protocole de laboratoire en identifiant de facteurs expérimentaux à explorer, s'approprier le fonctionnement de nouveaux matériels de laboratoire, calculer des grandeurs (forces, distances, vitesses, accélérations, etc.), construire des relations algébriques et des représentations graphiques (distance-temps, vitesse-temps et accélération-temps) modélisant le mouvement de divers objets matériels.

La quatrième justification se réfère au développement de deux compétences transversales : la première d'ordre de la communication (*communiquer de façon appropriée*) et la seconde d'ordre personnel et social (*coopérer*). La compétence transversale *Communiquer de façon appropriée* a été particulièrement mise en exergue par cet enseignant. Le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire insiste par ailleurs sur l'idée que le développement de la compétence disciplinaire *Communiquer sur des questions de physique à l'aide des langages utilisés en science et en technologie* contribue au développement de la compétence transversale *Communiquer de façon appropriée* : L'appropriation de concepts et l'apprentissage des langages scientifiques et technologiques concourent à la capacité des élèves à communiquer de façon appropriée. Ils doivent non seulement découvrir graduellement les codes et les conventions propres à ces langages, mais aussi apprendre à les maîtriser et à en exploiter les divers usages (Gouvernement du Québec, 2009, p. 6). Cette finalité communicationnelle s'inscrit dans la continuité de la première finalité concernant la compréhension et la conceptualisation des phénomènes de la physique, et est cohérente avec la responsabilité qui est accordée aux élèves en tant que « spécialistes d'une thématique disciplinaire » et acteurs à part entière à la construction collective des savoirs. De ce

fait, dans la seconde moitié de la séquence d'enseignement dédiée à la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation, les élèves sont appelés à présenter leur laboratoire en groupe-classe en mettant en évidence les concepts et modèles du mouvement associés aux phénomènes étudiés, en formulant et justifiant des énoncés scientifiques ou des conclusions sur ces phénomènes, et en proposant des situations d'application qui permettent de déployer les modèles vus dans d'autres contextes. Nous aimerions souligner ici qu'au-delà de cette finalité à caractère transversal exprimée par l'enseignant se cache une finalité importante de nature disciplinaire que nous avons rapportée dans la problématique : communication des idées et des connaissances par le passage d'un modèle mental à un modèle matérialisé. Nous référons ici à plusieurs chercheurs (ex. : Buckley et Boulter, 2000 ; Duit, 1991 ; Gilbert *et al.*, 2000 ; Harrison et Treagust, 2000 ; Justi et Gilbert, 2000 ; Koponen, 2007 ; Schwarz et White, 2005) qui, en s'appuyant sur les épistémologues Bunge (1983), Popper (2002/1935), Kuhn (1962) ou Lakatos et Musgrave (1970), mettent l'accent sur des aspects discursifs liés à l'utilisation des modèles, en les considérant comme des outils d'expression et de communication des connaissances et des idées scientifiques. Si au début de la démarche de modélisation dans les phases *Problématiser* et *Planifier* les élèves ont la possibilité d'exprimer leurs propres modèles mentaux (France, 2000 ; Mellar *et al.*, 1994 ; Nersessian, 1999 ; White et Frederiksen, 1990 ; Zimmermann, 2000) en regard du phénomène étudié, nous pensons que c'est dans la phase *Investiguer*, et plus particulièrement dans la phase *Conceptualiser et déployer* que se fait le passage des modèles mentaux aux modèles externes ou modèles exprimés<sup>116</sup>. Dans cette deuxième partie de la séquence d'enseignement centrée sur la communication des idées aux pairs, les élèves ont eu l'occasion d'extérioriser leur pensée, de visualiser et tester les composantes de leurs idées conceptuelles développées au sein de la démarche de modélisation, ce qui peut les aider grandement à faire progresser leur réflexion et à développer leur compréhension du monde matériel (Buckley et Boulter, 2000 ; Nersessian, 1999 ; Schwarz et White, 2005). Ce faisant, même si l'enseignant n'a pas fait allusion à l'idée de débat scientifique au cours de la démarche de modélisation, nos observations des séances dans cette deuxième partie de la séquence d'enseignement montrent que le milieu didactique s'est radicalement transformé en une communauté discursive scientifique mettant en jeu des processus de négociation qui pourraient être

---

<sup>116</sup> À l'instar de Nersessian (1999), nous pensons toutefois que les modèles externes produits par les élèves ne recouvrent pas nécessairement les modèles mentaux. Ces derniers ne sont pas communicables en totalité et une part d'implicite subsiste nécessairement.

comparables à ceux qui fonctionnent dans la communauté des savants (Johsua et Dupin, 1993 ; Lhoste, 2008 ; Orange, 2003). En permettant aux élèves de développer et de débattre des raisonnements sur des observations qualitatives ou quantitatives menées dans le MOE, dans le MTM ou encore entre ces deux mondes, les tâches effectuées par les élèves dans ces moments de présentation des laboratoires ont largement dépassé la simple description des activités expérimentales et des résultats obtenus. Dans cette forme d'organisation coopérative, les modèles externes construits par les élèves ont pu être exprimés, confrontés, raffinés et formalisés, et par conséquent ils ont constitué des supports aux débats scientifiques menés en classe (Buckley et Boulter, 2000 ; Johsua et Dupin, 1989). Plus encore, de tels débats où les interactions discursives enseignant-élèves et élèves-élèves sont centrés sur les processus de modélisation et les modèles produits par les élèves eux-mêmes favorisent la pensée scientifique et la construction collective des savoirs (Buckley et Boulter, 2000 ; Chevallard, 1991 ; Driver *et al.*, 2000 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Ogan-Bekiroglu et Belek, 2014 ; Orange, 1997, 2003 ; Osborne *et al.*, 2001 ; Schneeberger *et al.*, 2007). Quant à la compétence transversale *Coopérer*, son développement a été assuré tout au long de la démarche de modélisation, de la conception des protocoles de laboratoire à la communication des résultats, en passant par le recueil et l'analyse des données sous-jacents à la modélisation des phénomènes. Le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire souligne par ailleurs que la compétence transversale *Coopérer* constitue une compétence fondamentale pour la construction des savoirs en physique : « La construction des savoirs scientifiques appelle par ailleurs à la coopération, puisqu'elle repose largement sur le partage d'idées ou de points de vue, sur la validation par les pairs ou par des experts et sur la collaboration à diverses activités de recherche et d'expérimentation ou de résolution de problèmes. (Gouvernement du Québec, 2009, p. 6).

Enfin, une dernière justification de recourir aux modèles et à la démarche de modélisation a été rapportée par l'enseignant 2, soit l'acquisition de savoirs épistémologiques relatifs à la démarche scientifique et à la notion de modèle en physique. En engageant les élèves dans une démarche de modélisation constructiviste, l'enseignant 2 insiste sur l'idée que ceux-ci puissent se construire en même temps une nouvelle vision concernant la manière avec laquelle se font les sciences, ce qui se réfère au développement de compétences épistémologiques essentielles à l'apprentissage des sciences (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Schwartz et Lederman, 2005 ; Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009), mais pourtant absentes du programme de physique



de 5<sup>e</sup> secondaire dont les compétences disciplinaires relèvent essentiellement des aspects méthodologique (pour la compétence *Chercher des réponses ou des solutions à des problèmes relevant de la physique*), applicatif (pour la compétence *Mettre à profit ses connaissances en physique*) et langagier (pour la compétence *Communiquer sur des questions de physique à l'aide des langages utilisés en science et en technologie*).

### **3. SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION OPÉRATIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS**

#### **3.1 Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle macroscopique ?**

À l'échelle macroscopique, les séquences d'enseignement des deux enseignants présentent des similitudes quant aux groupes de savoirs associés au domaine de la cinématique qu'elles mobilisent, mais aussi des différences significatives quant au nombre de facettes de savoir et à la fréquence d'apparition totale des facettes associées à chacun de ces groupes. Dans les deux séquences d'enseignement, les acteurs de la classe sont appelés à construire des facettes de savoir pour six groupes communs : les groupes POSITION, DISTANCE PARCOURUE, VITESSE (vitesse, vitesse instantanée et moyenne), ACCÉLÉRATION (accélération, accélération instantanée et moyenne), MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) et MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA). Rappelons que ces groupes de savoirs sont ceux prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire et abordés dans les matériels didactiques. En comparant les réseaux de savoirs en relation avec les laboratoires associés aux deux séquences d'enseignement (**figures 24 et 91**), nous observons que la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 se distingue de celle de l'enseignant 2 par quatre groupes de savoirs traités de manière exclusive : DÉPLACEMENT, VARIATION DE LA VITESSE, MOUVEMENT et VECTEURS. Quant à la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, elle se distingue de la première séquence par le groupe de savoirs mouvement balistique qui est traité exclusivement dans celle-ci.

Si nous considérons le nombre de facettes de savoir et la fréquence d'apparition totale des facettes pour chacun des groupes relevant du domaine de la cinématique dans les deux séquences

d'enseignement, on remarque que l'enseignante 1 met plus l'accent sur l'acquisition des concepts comme la VITESSE (36 facettes ; N=127) et l'ACCÉLÉRATION (29 facettes ; N=152) que sur les modèles du mouvement, que ce soit le MODÈLE DU MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) (27 facettes, N=92) ou le MODÈLE DU MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) (49 facettes ; N=112). Quant à l'enseignant 2, son enseignement n'est pas centré sur l'acquisition des concepts du fait que les groupes de savoirs position, distance parcourue, vitesse, accélération sont tous constitués de moins de 20 facettes avec une fréquence d'apparition totale des facettes de moins de 70 facettes pour chacun de ces groupes. Dans cette classe, l'enseignement vise plutôt la construction des trois principaux modèles du mouvement : le MODÈLE DU MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME (MRU) (23 facettes, N=145), le MODÈLE DU MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ (MRUA) (65 facettes ; N=320) et le MODÈLE DU MOUVEMENT BALISTIQUE (MB) (49 facettes ; N=155). Si le nombre de facettes de savoir et la fréquence d'apparition totale des facettes pour le modèle du mouvement rectiligne uniforme sont sensiblement les mêmes dans les deux séquences d'enseignement, en considérant que la séquence 2 s'étale sur 3 séances de plus que la séance 1, la configuration est nettement différente dans les deux séquences pour les modèles du mouvement rectiligne uniformément accéléré et du mouvement balistique. En effet dans la classe de l'enseignant 2, le groupe de savoirs Mouvement rectiligne uniformément accéléré comporte un peu plus d'une quinzaine de facettes de plus que dans la classe de l'enseignante 1. Mais c'est surtout la fréquence d'apparition totale des facettes de ce groupe qui est largement supérieure dans la classe de l'enseignant 2 avec environ trois fois plus de facettes que dans la classe de l'enseignante 1 : 320 apparitions dans le groupe 2 comparativement à 112 dans le groupe 1. Soulignons par ailleurs que dans la classe de l'enseignant 2, le modèle du mouvement balistique est constitué d'un nombre important de facettes et est accompagné d'une fréquence d'apparition totale de facettes très importante si nous considérons que ces facettes ont été introduites en grande partie par un seul groupe d'élèves, ceux à qui l'enseignant a dédié le Lab-Mouvement balistique.

Les réseaux de savoirs en relation avec les laboratoires (**figures 24 et 91**) mettent en évidence un aspect très important concernant la manière avec laquelle le savoir se construit dans les deux classes, à savoir si celui-ci se construit au sein d'une démarche de modélisation ou en marge d'une telle démarche. Ces réseaux montrent que les deux séquences se distinguent nettement sur ce plan.

Dans la classe de l'enseignante 1, ce n'est qu'une faible partie des facettes des groupes de savoirs POSITION, DISTANCE PARCOURUE, DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, ACCÉLÉRATION, MOUVEMENT et MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ qui a été construite au sein d'un laboratoire commun à tous les élèves et qui met en jeu une démarche de modélisation dans le domaine de la cinématique : *Une descente en planche à neige*. Plus précisément, le modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré a été essentiellement construit en dehors d'une démarche de modélisation et le modèle du mouvement rectiligne uniforme a été entièrement construit en dehors d'une telle démarche. Dans la classe de l'enseignant 2, la configuration est toute autre. La séquence d'enseignement de cet enseignant articulée autour d'un projet collaboratif met en jeu huit laboratoires dans lesquels presque la totalité des facettes de savoir associées aux groupes de savoirs POSITION, DISTANCE PARCOURUE, VITESSE, ACCÉLÉRATION, MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORME, MOUVEMENT RECTILIGNE UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ et MOUVEMENT BALISTIQUE a été construite au sein d'une démarche de modélisation. Dans cette séquence d'enseignement, cinq laboratoires sont dédiés à la construction du modèle du mouvement rectiligne uniformément accéléré, soit les laboratoires 1) mouvement en chute libre, 2) mouvement vertical ascendant avec propulsion initiale, 3) mouvement sur un plan incliné descendant sans propulsion initiale, 4) mouvement sur un plan incliné ascendant avec propulsion initiale 5) mouvement sur des plans inclinés descendants avec influence du milieu (air/eau). Les autres modèles du mouvement sont plus particulièrement construits au sein de trois autres laboratoires : le laboratoire Mouvement sur une table à coussin d'air pour le modèle du mouvement rectiligne uniforme, le laboratoire Mouvement balistique pour le modèle du mouvement balistique et le laboratoire Mouvement pendulaire pour le modèle du mouvement pendulaire<sup>117</sup>.

Si tous les laboratoires s'inscrivent au sein d'une démarche de modélisation structurée autour des quatre phases (Problématiser, Planifier, Investiguer, Conceptualiser et déployer) retenues dans notre cadre conceptuel, et avec pour chacune de ces phases des tâches réalisées principalement par les élèves, c'est en grande partie dans les phases *Investiguer* et *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation que le savoir se construit. Dans la phase *Investiguer*, qui se déploie sur

---

<sup>117</sup> Ce dernier laboratoire n'ayant pas fait l'objet d'une analyse à l'échelle microscopique, car il met en jeu un modèle du mouvement autre que celui sur du MRU, du MRUA ou du MB.

la première moitié de la séquence, les élèves sont appelés à : recueillir des données à l'aide d'outils et d'instruments de mesure, calculer des grandeurs physiques (notamment des positions, distances, vitesses instantanées, vitesses moyennes, accélérations instantanées, accélérations moyennes), modéliser mathématiquement leur phénomène à l'aide de registres de représentation sémiotique divers (tabulaires, algébriques, graphiques et vectoriels), identifier des facteurs expérimentaux qui ont un effet ou non sur le phénomène à l'étude, etc. Dans la phase *Conceptualiser et déployer* recouvrant la seconde moitié de la séquence, les élèves sont appelés à : présenter les objectifs et conditions de réalisation de leur laboratoire ainsi que les principaux résultats obtenus en expliquant le comportement de leur phénomène (facteurs qui l'influencent ou non) à l'aide d'un modèle approprié, évaluer les résultats obtenus en comparant le modèle expérimental (résultats obtenus expérimentalement) avec le modèle théorique (résultats attendus) et expliquer les écarts entre ces modèles, proposer des pistes d'amélioration du protocole, appliquer les modèles construits dans de nouveaux contextes, etc.

### **3.2 Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle mésoscopique ?**

Sur le plan thématique, les deux séquences d'enseignement présentent trois thèmes communs : le mouvement rectiligne uniforme (MRU), le mouvement rectiligne uniformément accéléré (MRUA) et la juxtaposition de ces deux mouvements, soit le thème MRU ou MRUA. La séquence d'enseignement de l'enseignante 1 se distingue de celle de l'enseignant 2 par deux thèmes qui lui sont exclusifs : le thème 1-Variables du mouvement qui est subdivisé en 7 sous-thèmes regroupant l'un ou l'autre des concepts de cinématique distance parcourue, déplacement, vitesse, variation de la vitesse et accélération ; le thème 2-Vecteurs qui est subdivisé en 2 sous-thèmes regroupant les vecteurs appréhendés sous l'angle mathématique ou sous l'angle de la physique. Quant à la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, elle se distingue de celle de l'enseignante 1 par deux thèmes qui lui sont exclusifs : le thème 4-Mouvement balistique qui combine à la fois le MRU et le MRUA (MRU et MRUA) et le thème 5-Mouvement pendulaire.

Si ces séquences ont trois thèmes en commun, la proportion du temps accordée pour le traitement de ces thèmes et les moments où ces thèmes sont traités sur la séquence diffèrent

nettement. Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, le thème MRU occupe seulement 7,6 % du temps de la séquence alors que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, il occupe environ deux fois plus de temps (13,4 %). Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, le thème MRUA occupe seulement 16,4 % du temps de la séquence alors que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, il occupe environ trois fois plus de temps (49 %). Quant au thème MRU ou MRUA, il occupe également une proportion de temps un peu plus importante dans la deuxième séquence (12,9 %). Ceci découle du fait que l'enseignante 1 accorde une grande importance à deux thèmes qui, ensemble, mobilisent un peu plus de 50 % du temps de la séquence, soit le thème 2-Vecteurs, qui occupe 33,9 % du temps, et le thème 1-Variables du mouvement, qui occupe 20,5 % du temps de la séquence. Soulignons par ailleurs que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, le thème 5-Mouvement balistique (MRU + MRUA), qui est traité en grande partie par une seule équipe d'élèves, représente 14,1 % du temps de cette séquence. Enfin, la gestion du travail (aucun thème disciplinaire), qui se fait essentiellement au début ou à la fin de chacune des séances et qui consiste à présenter le déroulement des séances, donner explications générales sur des tâches à réaliser ou encore à décrire des modalités d'évaluation des apprentissages, occupe une proportion de temps légèrement plus importante dans la classe de l'enseignante 1 (12,2 %) que dans celle de l'enseignant 2 (7,8 %).

Par ailleurs, dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, les thèmes sont couverts par bloc, de manière discontinue au cours de la séquence, alors que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, les thèmes disciplinaires sont tous couverts de manière continue (ou en alternance si nous considérons le point de vue de la caméra qui suit les interventions de l'enseignant auprès des élèves lorsque la modalité d'organisation de la classe en équipe s'applique) au cours de la première moitié de la séquence (7 premières séances) qui est dédiée aux moments de problématisation, de planification et d'investigation de la démarche de modélisation. Dans la seconde moitié de la séquence (7 dernières séances), qui est dédiée aux moments de conceptualisation et de déploiement des modèles de la démarche de modélisation, les thèmes sont couverts par bloc, de manière discontinue, puisqu'ils correspondent à la présentation des 7 laboratoires : le MRU est couvert lors de la séance 8, le MRUA est couvert lors des séances 9 à 12 ; le thème MRU ou MRUA est couvert lors de la séance 13 et le thème Mouvement balistique est couvert lors de la séance 14. Par conséquent, on peut dénoter des différences significatives sur

le plan thématique entre les deux enseignants : l'enseignante 1 accorde une priorité tout aussi importante à l'enseignement des concepts de cinématique ou à celui des vecteurs (en mathématiques ou en physique) qu'à l'enseignement des modèles du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré, contrairement à l'enseignant 2, qui accorde une priorité à l'enseignement des divers modèles de la cinématique.

Sur le plan des contextes de traitement des thèmes disciplinaires, les deux séquences d'enseignement présentent des configurations diamétralement opposées. Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, les thèmes disciplinaires sont essentiellement traités à travers la théorie (40,7 % du temps) et l'exercisation (31,2 % du temps), ce dernier contexte se déclinant en des proportions à peu près égales en la réalisation d'exercices (14 % du temps) et en la correction d'exercices (17,2 % du temps). Les laboratoires occupent une proportion de temps très faible de la séquence avec 15,1 % du temps, qui se répartit en des moments d'explication préalables aux laboratoires, des moments de réalisation des laboratoires et des moments de correction des laboratoires. Dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, les contenus disciplinaires de cinématique et de dynamique sont essentiellement traités à travers les laboratoires. En effet, dans environ 65 % du temps de cette séquence, les élèves sont engagés dans la réalisation (43,4 % du temps : conception et mise en œuvre du protocole, recueil des données, rédaction du rapport de laboratoire, etc.) ou la présentation des laboratoires (24,3 % du temps : présentation du contexte d'expérimentation et des résultats du laboratoire en mettant en évidence les modèles décrivant le mouvement du phénomène étudié, etc.). Les autres contextes de traitement des thèmes disciplinaires comme les moments d'exercisation (12,6 % du temps de la séquence), les moments de théorisation (6,3 % du temps de la séquence), les explications générales (8,4 % du temps de la séquence) ou les explications spécifiques des laboratoires (5 % du temps de la séquence) occupent une proportion de temps beaucoup moins importante, soit environ 35 % du temps de cette séquence. Soulignons par ailleurs que les moments de théorisation dans la séquence d'enseignement 1 sont en grande partie dissociés des laboratoires et sont pris en charge par l'enseignante alors que dans la séquence d'enseignement 2, les moments de théorisation sont étroitement associés aux laboratoires et sont pris en charge par l'enseignant ou les élèves. Ces résultats mettent en évidence que c'est de loin la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 qui présente le plus fort potentiel pour engager intellectuellement les élèves dans l'étude de phénomènes impliquant la modélisation

de données empiriques en lien avec l'un ou l'autre des 4 modèles du mouvement traités : le MRU, le MRUA, le MB et le MP.

Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, les deux séquences d'enseignement présentent également des configurations diamétralement opposées. Si nous considérons le laboratoire sur les vecteurs *La souque à la corde scientifique* dans le domaine de la dynamique et le laboratoire sur le plan incliné descendant sans propulsion initiale *Une descente en planche à neige* dans le domaine de la cinématique comme étant les seuls moments de la séquence de l'enseignante 1 où il y a véritablement démarche de modélisation, une proportion très faible de la séquence se réalise au sein d'une telle démarche. En effet, dans seulement 18 % du temps de cette séquence les élèves sont engagés dans la phase *Problématiser* (3,4 % du temps), *Investiguer* (10,8 % du temps) ou encore dans la phase *Conceptualiser et déployer* (3,8 % du temps) d'une démarche de modélisation. La phase *Planifier* est absente puisque les protocoles de ces deux laboratoires sont entièrement donnés aux élèves. En conséquence, cette séquence d'enseignement est déployée en grande partie en marge d'une démarche de modélisation quelconque. À contrario, la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 se déroule entièrement au sein d'une démarche de modélisation. Les deux premières phases de la démarche de modélisation, les phases *Problématiser* et *Planifier*, se déploient au cours des deux premières séances et occupent des proportions de temps (respectivement de 5 % et de 9,4 %) faibles que les deux autres phases de la démarche de modélisation, les phases *Investiguer* et *Conceptualiser et déployer*, qui se déploient dans les séances subséquentes et qui mobilisent respectivement 36,3 % du temps et 49,3 % du temps de la séquence. Ces résultats mettent en évidence que l'enseignant 2 accorde une grande importance à l'investigation et à la conceptualisation, et en particulier, au recueil de données pour la construction des faits scientifiques.

Sur le plan des ressources didactiques, la ressource didactique qui est de loin la plus utilisée dans la classe de l'enseignante 1 est le cahier d'apprentissage (47,7 % du temps). Ce cahier d'apprentissage qui fait à la fois office de manuel de l'élève, en fournissant des contenus théoriques, et de cahier d'exercices, en fournissant des exercices en lien avec les contenus disciplinaires qu'ils véhiculent, est utilisé en grande partie de manière conjointe par l'enseignante et les élèves (37 % du temps) dans les moments de présentation des notions théoriques (17,3 % du temps) et aussi dans

les moments de réalisation (7,4 % du temps) et de correction (13,2 % du temps) des exercices en plénière. Les notes de cours, également utilisées conjointement par l'enseignante et les élèves en vue de faire la synthèse des notions théoriques qui ont déjà été abordées avec le cahier d'apprentissage dans les cours antérieurs, sont utilisées dans 16,3 % du temps de la séquence. Quant aux ressources didactiques en lien avec les laboratoires (matériel de laboratoire, documents de laboratoire et rapport de laboratoire), elles sont utilisées dans une moindre proportion du temps, soit chacune moins de 12 % du temps de la séquence. À ce sujet, le matériel de laboratoire est utilisé deux fois plus souvent par l'enseignante que par les élèves au cours de la séquence, et ce pour la présentation des notions théoriques dans le cadre de diverses démonstrations expérimentales. Dans la séquence de l'enseignant 2, même si le cahier d'apprentissage fait l'objet d'une utilisation importante en classe (24,8 % du temps), ce sont les ressources didactiques en lien avec les laboratoires qui sont les plus fréquemment utilisées, plus particulièrement le document de laboratoire (20,9 % du temps), le matériel de laboratoire (25 % du temps) et le rapport de laboratoire (54,6 % du temps), et ces ressources font l'objet d'une utilisation presque exclusive par les élèves. Pour résumer, si les ressources didactiques utilisées dans les deux classes sont essentiellement les mêmes, les acteurs qui les prennent en charge et leur temps d'utilisation ne sont pas du tout les mêmes.

Enfin, sur le plan des modalités d'organisation de la classe, le dernier indicateur d'ordre mésoscopique, les configurations sont également très différentes dans les deux classes. Dans la séquence d'enseignement de l'enseignante 1, la modalité d'organisation de la classe dominante est le travail en grand groupe qui est effectué dans près de 80 % du temps de la séquence, plus particulièrement dans les moments de théorisation et d'exercisation. Le travail en équipe (14,6 % du temps) dans les moments de réalisation des laboratoires et d'exercisation et le travail individuel (7,9 % du temps) dans les moments d'exercisation occupent une proportion du temps beaucoup moins importante. À contrario, dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, si la modalité d'organisation de la classe dominante est aussi le travail en grand groupe (56,1 % du temps), cette modalité est prédomine, plus particulièrement dans les moments de présentation des laboratoires qui sont sous la responsabilité des élèves dans la deuxième moitié de la séquence, et non dans les moments de théorisation ou d'exercisation qui sont sous la responsabilité de l'enseignant, comme c'est le cas chez l'enseignante 1. Le travail en équipe qui est sous la responsabilité des élèves et



qui est effectué exclusivement dans la réalisation des laboratoires dans la première moitié de la séquence d'enseignement occupe une proportion de temps relativement élevée, soit 43,7 % du temps de la séquence. Quant au travail individuel, il est presque absent de cette séquence.

En guise de synthèse, les **figures 142 et 143** donnent un aperçu mésoscopique des pratiques d'enseignement des deux enseignants.

Thèmes

<b>Concepts</b> (21 % du temps) 110 facettes ; N=436*	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11					
	Référentiel								Référentiel							
	Distance parcourue															
	Déplacement															
	Vitesse															
	Vitesse moyenne et instantanée				Vitesse moyenne et instantanée											
	Variation de la vitesse				Variation de la vitesse											
	Accélération															
	Vecteurs								Vecteurs							
						MRU				MRU		MRU				
<b>Vecteurs</b> (34 % du temps) 0 facette ; N=0						MRUA				MRUA						
<b>MRU</b> (13 % du temps) 27 facettes ; N=92																
<b>MRUA</b> (20 % du temps) 49 facettes ; N=112																
<b>Contextes</b>	Théorie					Théorie		Théorie		Théorie						
	Exercitation					Exercitation				Exercitation						
	41%	31%	15 %	Lab. La souque à la corde scientifique				Lab. Plan incliné descendant		Lab. La souque à la corde scientifique		Lab. Plan incliné descendant				
	<b>Intentions</b>	<i>S'approprier le vocabulaire associé aux concepts de cinématique</i>			Construire un modèle vectoriel d'un système en équilibre			Appliquer les modèles du MRU et MRUA		Valider le modèle du MRUA		Construire un modèle vectoriel d'un système en équilibre		Appliquer les modèles du MRU et MRUA		Valider le modèle du MRUA
Appliquer les modèles du MRU et MRUA																
Hors démarche			Hors démarche			Hors démarche		Hors démarche		Hors démarche		Hors démarche		Hors démarche		
Problématiser			Problématiser			Problématiser		Problématiser		Problématiser		Problématiser		Problématiser		
Investiguer			Investiguer			Investiguer		Investiguer		Investiguer		Investiguer		Investiguer		
<b>Phases de la démarche</b>																
<b>MOC</b> GG : 77% EQ : 15% IIND : 8%																

Figure 142- Aperçu mésoscopique de la pratique d'enseignement de l'enseignante 1

Thèmes


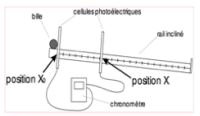
<b>Concepts</b> 37 facettes ; N=136
<b>MRU</b> (20 % du temps) 23 facettes ; N=145
<b>MRUA</b> (55 % du temps) 65 facettes ; N=320*
<b>MB (15 % du temps)</b> 49 facettes ; N=155*



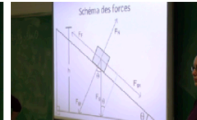
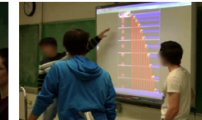

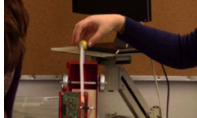
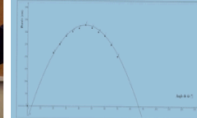
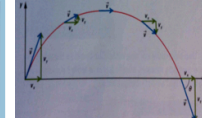
<b>Contextes</b>
76%13%6%

S1	S2	S3 à S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14		
MRU				MRUA					MRU		
MRUA											MB
MB											
<b>7 laboratoires</b> A-Mouvement en chute libre B-Mouvement vertical ascendant avec PI C-Mouvement sur table à coussin d'air D-Mouvement sur plan incliné descendant sans PI E-Mouvement sur plan incliné descendant avec PI F-Mouvement sur plan incliné descendant sans PI avec milieu G-Mouvement balistique			-C- Lab Mouvement sur table à coussin d'air	-A- Lab Mouvement en chute libre	-B- Lab Mouvement vertical ascendant avec PI	-D- Lab Mouvement sur plan incliné descendant sans PI	-E- Lab Mouvement sur plan incliné descendant avec PI	-F- Lab Mouvement sur plan incliné descendant sans PI avec milieu	-G- Lab Mouvement balistique		
Laboratoires (Explication et réalisation)				Laboratoire (Explication et présentation)							
				Exercitation					Exercitation		
				Théorie (Introduite par P)		Théorie (Introduite par P)					

Intentions

<b>MOC</b> GG : 56% EQ : 4%
-----------------------------------

<i>S'approprier des montages de laboratoire et le fonctionnement d'instruments de mesure</i>



<i>Construire, présenter et appliquer des modèles du mouvement de différents phénomènes physiques, en s'appuyant sur les variables du mouvement (position, vitesse et accélération)</i>			
			
			

Phases de la démarche

Problématiser Planifier	Planifier	Investiguer	Conceptualiser et déployer
----------------------------	-----------	-------------	----------------------------

Figure 143- Aperçu mésoscopique de la pratique d'enseignement de l'enseignant 2

### 3.3 Quelles pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation à l'échelle microscopique ?

#### 3.3.1 Des configurations significativement différentes selon les tâches épistémiques

L'analyse des pratiques d'enseignement sous l'angle des tâches épistémiques montre que les pratiques d'enseignement des deux enseignants peuvent être décrites au moyen de 21 tâches épistémiques (Collins et Ferguson, 1993 ; Ohlsson, 1996) visant à caractériser l'activité de modélisation nécessaire à la compréhension du monde matériel. Cette activité, qui est au cœur du fonctionnement de la physique, implique des processus de pensée mettant en relation des objets du « monde des théories et des modèles » (MTM) et des objets du « monde des objets et des événements » (MOE) (Coince *et al.*, 2008 ; Gaidioz et Tiberghien, 2003 ; Gaidioz *et al.*, 2004 ; Tiberghien, 1994 ; Tiberghien et Malkoun, 2010 ; Tiberghien *et al.*, 2007a ; Tiberghien, Veillard, Le Maréchal, Buty et Millar, 2001 ; Tiberghien et Vince, 2005).

Ces 21 tâches épistémiques, sans distinction aux acteurs qui les prennent en charge ou aux registres de modélisation qu'elles peuvent mobiliser, sont en nombre important. Dans la séquence de l'enseignante 1, leur fréquence d'apparition est de 2 909 pour une séquence d'enseignement de 11 séances et d'une durée totale d'environ 12 heures, alors que dans la séquence de l'enseignant 2 leur fréquence d'apparition est de 3 740 pour une séquence d'enseignement de 14 séances et d'une durée totale d'environ 16 heures. Les tâches épistémiques communes les plus fréquemment mobilisées en regard de leur fréquence d'apparition (tous thèmes confondus) dans les deux séquences d'enseignement sont les tâches épistémiques ÉVALUER (classe 1 : N=544 ; classe 2 : N=1150), EXPLIQUER (classe 1 : N=371 ; classe 2 : N=589), DÉCRIRE (classe 1 : N=359 ; classe 2 : N=724) et ÉNONCER (classe 1 : N=274 ; classe 2 : N=172). Au rang des six tâches épistémiques les plus fréquemment mobilisées, la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 se distingue toutefois de la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, par la prédominance des tâches INTERPRÉTER (N=228) et DÉFINIR (N=221), alors que la séquence d'enseignement de l'enseignant 2 se distingue par la prédominance des tâches Identifier (N=201) et Comparer (N=152).

Notre analyse des pratiques d'enseignant sous l'angle tâches épistémiques montre que si la durée moyenne des tâches épistémiques est sensiblement la même dans les deux séquences d'enseignement (15 secondes dans la classe 1 et 17 secondes dans la classe 2), la durée moyenne des tâches épistémiques varie considérablement selon la nature de la tâche. Dans la séquence d'enseignement 1 par exemple, la durée moyenne des tâches épistémiques GÉNÉRALISER (DM=52 s), DÉFINIR (DM=49 s) et CONCLURE (DM=37 s) est nettement supérieure à celle des autres tâches et dans la séquence d'enseignement 2, la durée moyenne des tâches épistémiques Générer (DM= 270 s) et FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DM= 270 s) est nettement supérieure à celle des autres tâches. Par ailleurs, pour les mêmes tâches épistémiques, la durée moyenne varie d'une classe à l'autre. Par exemple, des écarts importants sont à signifier pour la tâche DÉFINIR qui est d'une durée moyenne de 49 secondes dans la classe 1 et de 19 secondes dans la classe 2, pour la tâche FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES qui est de 21 secondes dans la classe 1 et de 82 secondes dans la classe 2, et pour la tâche GÉNÉRER qui est d'une durée moyenne de 12 secondes dans la classe 1 et de 270 secondes dans la classe 2. Cette différence importante de temps moyen entre les tâches épistémiques menées au sein d'une même classe ou entre les classes conduit à les

repositionner selon leur durée totale (en minutes) dans les séquences. Ainsi, une partie importante de la séquence d'enseignement de l'enseignante 1 consiste à EXPLIQUER (DT=180,2 min), DÉFINIR (DT=110,6 min) ou DÉCRIRE (DT=77,1 min) alors que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, ce sont les tâches EXPLIQUER (DT=288,8 min), FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES (DT= 131,1 min) et ÉVALUER (DT= 128,4 min) qui couvrent la proportion de temps la plus grande. Ces résultats indiquent que dans la séquence d'enseignement 1, il y a une forte propension à définir du savoir sur une plus longue durée, et que dans la séquence d'enseignement de l'enseignant 2, les opérations formelles sont exposées de manière plus détaillée. Quant à la durée moyenne de la tâche GÉNÉRER, elle est nettement plus longue dans la séquence d'enseignement 2, car elle porte entre autres sur la capacité des élèves à générer des protocoles de laboratoire, alors que cette tâche est absente de la séquence d'enseignement 1.

Sur le plan des registres de modélisation, dans la séquence d'enseignement 1, plus de la moitié des tâches épistémiques (55 %) prend ancrage dans le MTM, alors qu'une faible proportion de celles-ci le prend dans le MOE (17 %) ou met en relation les deux mondes (MOE-MTM) (28 %). Ainsi, une priorité est accordée à la construction du registre théorique au détriment de la construction du registre empirique. Nos analyses indiquent, par ailleurs, que si les registres de modélisation sont mobilisés de manière variable selon la nature des tâches épistémiques, c'est le registre du MTM qui est le plus souvent sollicité, soit dans les tâches CLASSIFIER, COMPARER, CONCLURE, DÉCRIRE, DÉDUIRE, DÉFINIR, ÉNONCER ÉVALUER, EXPLIQUER, FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, GÉNÉRALISER, IDENTIFIER et SÉLECTIONNER. Ces résultats témoignent de la faible préoccupation de l'enseignante 1 à ce que les élèves puissent construire un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique. En effet, dans cette classe, nous observons une faible proportion de temps accordé aux élèves pour explorer des objets divers (ex. : montages, matériels de laboratoire, procédures de recueils de données, etc.) du registre empirique, et de même, une proportion de temps relativement faible pour mettre en relation ces objets avec des événements pouvant être modélisés par l'un ou l'autre des deux modèles du mouvement : le MRU et le MRUA (le MB n'ayant pas été étudié dans cette séquence). Dans la séquence d'enseignement 2, les tâches épistémiques prennent ancrage essentiellement dans une proportion similaire dans le MOE (40 %) ou le MTM (39 %). Dans une moindre proportion, les tâches épistémiques mettent en relation le MOE avec le MTM (21 %). Ainsi, une priorité similaire est accordée à la connaissance des objets

(expérimentaux et physiques) et la maîtrise des actions réalisées sur ces objets dans le champ empirique des objets et événements et la construction des objets théoriques dans le monde des théories et des modèles. Dans cette classe, si les registres de modélisation sont mobilisés de manière variable selon la nature des tâches épistémiques, le registre du MOE y est beaucoup plus mobilisé que dans la classe de l'enseignante 1 : en plus des tâches épistémiques MESURER et SIMULER qui sont davantage ancrées dans le MOE, nous incluons les tâches épistémiques ARGUMENTER, DÉCRIRE, ÉVALUER, GÉNÉRER et SÉLECTIONNER. Ces résultats témoignent de la préoccupation de la part de l'enseignant 2 à ce que les élèves puissent construire un capital d'expériences suffisamment riche dans le registre empirique. Dès la première séance, l'accent est mis sur l'exploration d'objets divers (ex. : montages, matériels de laboratoire, procédures de recueils de données, etc.) lesquels sont mis en relation avec une grande diversité d'événements pouvant être modélisés par l'un ou l'autre des trois modèles du mouvement : le MRU, le MRUA et le MB.

Certes, les deux séquences d'enseignement engagent l'enseignant et les élèves dans une grande diversité de tâches épistémiques, mais à quels niveaux taxonomiques ces tâches se situent-elles? Cette question est d'une grande importance si nous postulons que les activités de modélisation nécessaires à la compréhension du monde matériel impliquent, de la part de l'enseignant et des élèves, le recours à des tâches épistémiques dont le niveau taxonomique est particulièrement élevé. Ainsi, de manière à comparer la répartition des 21 tâches épistémiques en jeu dans les deux séquences d'enseignement selon les six domaines de cognition proposés par Anderson et Krathwohl (Anderson *et al.*, 2001 ; Krathwohl, 2002 ; Wilson, 2013) ([annexe 15](#)), nous considérons les six indices F1, F2, F2 et T1, T2, T1 et T2 définis dans la légende sous le [tableau 91](#) et nous attribuons ces indices aux tâches épistémiques selon qu'elles présentent une fréquence d'apparition ou une durée relativement élevée sur la séquence. Ce tableau montre que les deux séquences d'enseignement partagent quatre tâches épistémiques dont la fréquence d'apparition totale est relativement élevée et qui relèvent de niveaux taxonomiques de complexité variable entre le premier et le cinquième niveau de cognition : le premier niveau de cognition « Se souvenir ou se rappeler » pour la tâche épistémique ÉNONCER ; le second niveau de cognition « Comprendre » pour les tâches épistémiques DÉCRIRE et EXPLIQUER ; le cinquième niveau de cognition « Synthétiser / Évaluer » pour la tâche épistémique ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER). À celles-ci s'ajoutent les tâches épistémiques du deuxième niveau de cognition DÉFINIR et

INTERPRÉTER mobilisées avec une plus grande fréquence d'apparition totale dans la classe 1 et les tâches épistémiques IDENTIFIER et COMPARER des niveaux de cognition 1 et 4 mobilisées avec une plus grande fréquence d'apparition totale dans la classe 2. Si nous considérons la durée totale des tâches épistémiques sur les deux séquences, nous observons que les tâches épistémiques dont la durée totale est élevée dans la classe 1 sont les tâches DÉCRIRE, EXPLIQUER et DÉFINIR relèvent toutes du deuxième niveau de cognition alors que les tâches dont la durée totale est élevée dans la classe 2 relèvent du troisième niveau de cognition « Appliquer » pour la tâche FAIRE DE OPÉRATIONS FORMELLES et du quatrième niveau de cognition pour la tâche ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER). Ainsi, c'est davantage dans la séquence d'enseignement 2 que les acteurs de la classe sont appelés à mobiliser des tâches épistémiques dont le niveau taxonomique est élevé.

Tableau 91 : Fréquence d'apparition totale et proportion de temps mobilisée par les 21 tâches épistémiques dans les 2 séquences d'enseignement réparties selon les 6 domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl

Domaines de cognition	Tâches épistémiques en jeu dans la compréhension du monde matériel
Niveau 1 : se souvenir ou se rappeler	ÉNONCER <sup>F1 et F2</sup>
Niveau 2 : comprendre	DÉCRIRE <sup>F1 et F2 / T1</sup> , EXPLIQUER <sup>F1 et F2 / T1</sup> , DÉFINIR <sup>F1 / T1</sup> , INTERPRÉTER <sup>F1</sup> , IDENTIFIER <sup>F2</sup> , EXEMPLIFIER, SÉLECTIONNER
Niveau 3 : appliquer	FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES <sup>T2</sup> , MESURER, SIMULER
Niveau 4 : analyser	COMPARER <sup>F2</sup> , CLASSIFIER, REPRÉSENTER
Niveau 5 : synthétiser / évaluer	ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER) <sup>F1 et F2 / T2</sup> , ARGUMENTER, CONCLURE, DÉDUIRE, GÉNÉRALISER ET PRÉDIRE
Niveau 6 : créer	GÉNÉRER

**Légende**

F1 : Tâche épistémique dont la fréquence d'apparition totale est relativement élevée dans la classe 1

F2 : Tâche épistémique dont la fréquence d'apparition totale est relativement élevée dans la classe 2

F1etF2 : Tâche épistémique dont la fréquence d'apparition totale est relativement élevée dans les deux classes

T1 : Tâche épistémique dont la durée totale est relativement élevée dans la classe 1

T2 : Tâche épistémique dont la durée totale est relativement élevée dans la classe 2

T1etT2 : Tâche épistémique dont la durée totale est relativement élevée dans les deux classes

Sur le plan thématique, si les tâches épistémiques se déclinent généralement dans l'ensemble des thèmes disciplinaires, la densité des tâches épistémiques (nombre de tâches épistémiques par minute) est variable selon les thèmes disciplinaires (toutes tâches confondues) dans les deux séquences d'enseignement. Selon les thèmes, la densité des tâches épistémiques varie entre 3 et 7 tâches par minute. Pour le thème disciplinaire MRU, la densité thématique est sensiblement la même dans les deux séquences (5,4 pour la classe 1 et 5,0 pour la classe 2), mais pour le thème

disciplinaire MRUA la densité thématique dans la classe 1 (6,3 tâches par minutes) est nettement supérieure à celle dans la classe 2 (4 tâches par minutes). Dans la séquence d'enseignement 1, les thèmes disciplinaires qui touchent directement les modèles du MRU et du MRUA sont ceux les plus denses sur le plan de tâches épistémiques. Globalement, la densité des tâches épistémiques est plus grande dans les thèmes où l'on aborde les modèles du mouvement plutôt que dans les thèmes associés aux concepts de cinématique comme la position, le déplacement, la vitesse ou l'accélération.

Sur le plan de la prise en charge des tâches épistémiques, les deux séquences d'enseignement se distinguent nettement. Dans la séquence d'enseignement 1, la prise en charge des tâches épistémiques, qu'elles soient suscitées ou réalisées par l'enseignante, les élèves ou le manuel scolaire, se fait essentiellement par l'enseignante. Près de 70 % des tâches épistémiques sont prises en charge par l'enseignante alors qu'environ 30 % le sont par les élèves. Sans distinguer si ces tâches sont suscitées ou réalisées par les acteurs, 19 des 21 tâches épistémiques sont davantage prises en charge par l'enseignante, et parmi celles-ci, certaines présentent un écart important sur le plan de leur distribution, par exemple les tâches épistémiques DÉFINIR, ÉVALUER, EXPLIQUER et REPRÉSENTER qui sont prises en charge 3 à 4 fois plus par l'enseignante que par les élèves. Seules deux tâches épistémiques sont davantage prises en charge par les élèves que par l'enseignante : les tâches épistémiques MESURER et PRÉDIRE. La configuration est toute autre dans la séquence d'enseignement 2 où la prise en charge des tâches épistémiques par les élèves (55 % des tâches) est supérieure à la prise en charge des tâches épistémiques par l'enseignant (45 % des tâches). De manière spécifique, sans distinguer si les tâches épistémiques sont suscitées ou réalisées, les tâches ARGUMENTER, CLASSIFIER, COMPARER, CONCLURE, DÉCRIRE, DÉDUIRE, DÉFINIR, ÉNONCER, EXEMPLIFIER, EXPLIQUER, GÉNÉRALISER, GÉNÉRER, IDENTIFIER, INTERPRÉTER et MESURER sont davantage sous la responsabilité des élèves alors que les tâches épistémiques ÉVALUER, FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, REPRÉSENTER, SÉLECTIONNER et SIMULER le sont un peu plus sous la responsabilité de l'enseignant.

Si nous comparons la prise en charge des 21 tâches épistémiques selon les 6 domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl (Anderson *et al.*, 2001 ; Krathwohl, 2002 ; Wilson, 2013) en considérant cette fois-ci les quatre indices E1, E2, P1 et P2 définis dans la légende sous le

**tableau 92**, qui désignent les tâches épistémiques les plus fortement prises en charge par les acteurs de la classe, on remarque que les deux séquences partagent seulement deux tâches épistémiques qui sont davantage prises en charge par l'enseignant, soit la tâche du quatrième niveau de cognition REPRÉSENTER et la tâche du cinquième niveau de cognition ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER) et qu'elles partagent une seule tâche épistémique davantage prise en charge par les élèves, soit la tâche du troisième niveau de cognition MESURER. Dans la séquence d'enseignement 1, outre la tâche épistémique MESURER, seule la tâche épistémique Prédire du cinquième niveau de cognition est davantage prise en charge par les élèves, alors que dans la séquence d'enseignement 2 les élèves sont appelés à prendre en charge des tâches épistémiques qui relèvent de l'ensemble des six domaines de cognition. Ces résultats montrent que c'est la séquence d'enseignement 2 qui offre aux élèves la possibilité de prendre en charge activement une grande diversité de tâches épistémiques réparties dans les six domaines de cognition, d'une part, et dans laquelle les activités de modélisation nécessaires à la compréhension du monde matériel impliquent des tâches épistémiques dont le niveau taxonomique est particulièrement élevé.

Tableau 92 : Prise en charge des 21 tâches épistémiques par les acteurs de la classe selon les 6 domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl

Domaines de cognition d'Anderson et Krathwohl	Tâches épistémiques en jeu dans la compréhension du monde matériel
Niveau 1 : se souvenir ou se rappeler	ÉNONCER <sup>E2</sup>
Niveau 2 : comprendre	DÉCRIRE <sup>E2</sup> , EXPLIQUER <sup>P1/E2</sup> , DÉFINIR <sup>P1/E2</sup> , INTERPRÉTER <sup>E2</sup> , IDENTIFIER <sup>E2</sup> , EXEMPLIFIER <sup>E2</sup> et SÉLECTIONNER <sup>P2</sup>
Niveau 3 : appliquer	FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES <sup>P2</sup> , MESURER <sup>E1/E2</sup> et SIMULER <sup>P2</sup>
Niveau 4 : analyser	COMPARER <sup>E2</sup> , CLASSIFIER <sup>E2</sup> et REPRÉSENTER <sup>P1/P2</sup>
Niveau 5 : synthétiser / évaluer	ÉVALUER (JUGER/CRITIQUER) <sup>P1/P2</sup> , ARGUMENTER <sup>E2</sup> , CONCLURE <sup>E2</sup> , DÉDUIRE <sup>E2</sup> , GÉNÉRALISER <sup>E2</sup> et PRÉDIRE <sup>E1</sup>
Niveau 6 : créer	GÉNÉRER <sup>E2</sup>

**Légende**

E1 : Tâche épistémique fortement prise en charge par les élèves dans la classe 1  
E2 : Tâche épistémique fortement prise en charge par les élèves dans la classe 2  
P1 : Tâche épistémique fortement prise en charge par l'enseignant dans la classe 1  
P2 : Tâche épistémique fortement prise en charge par l'enseignant dans la classe 2

Sur le plan des registres de modélisation mobilisés par les tâches épistémiques, les configurations se distinguent nettement entre les deux séquences d'enseignement. Dans la séquence



d'enseignement 1, la plupart des tâches épistémiques (55 %) prend ancrage dans le MTM, et une moindre proportion est ancrée dans le MOE (17 %) ou met en relation les deux mondes (MOE-MTM) (28 %). À contrario, dans la séquence d'enseignement 2, les tâches épistémiques sont essentiellement ancrées dans une proportion similaire dans le MOE (40 %) ou dans le MTM (39 %). Une moindre proportion des tâches épistémiques de cette séquence met en relation le MOE avec le MTM (21 %). Cette différence de configuration entre les deux séquences montre qu'une faible priorité est accordée à la construction du registre empirique au détriment du registre théorique chez l'enseignante 1. Si ces résultats montrent qu'il y a modélisation des phénomènes dans les deux séquences d'enseignement, dans la séquence d'enseignement 1 l'accent est mis pour la construction du registre théorique. Autrement dit, ce sont les tâches épistémiques visant la connaissance des objets théoriques, c'est-à-dire les constructions abstraites comme les concepts ou les modèles qui prédominent dans cette séquence. Dans la séquence d'enseignement 2, l'accent est tout autant mis pour la construction du registre empirique que celle du registre théorique. Ainsi, dans cette séquence, la connaissance des objets (expérimentaux et physiques) et la maîtrise des actions réalisées sur ces objets dans le champ empirique des objets et événements apparaissent également centrales dans la compréhension des phénomènes. De notre point de vue, cette deuxième configuration qui permet de faire des ancrages dans le monde matériel présente un potentiel plus élevé pour la compréhension des phénomènes.

Cette différence de configuration sur le plan des registres de modélisation se traduit par une mobilisation très variable des registres de modélisation impliqués dans les tâches épistémiques. Les deux séquences d'enseignement se caractérisent par des tâches épistémiques qui portent essentiellement sur l'un ou l'autre des registres de modélisation : les tâches épistémiques MESURER et SIMULER portent essentiellement MOE ; les tâches épistémiques CLASSIFIER, CONCLURE, DÉFINIR, ÉNONCER EXPLIQUER, FAIRE DES OPÉRATIONS FORMELLES, GÉNÉRALISER, IDENTIFIER qui portent essentiellement sur le MTM ; et les tâches épistémiques EXEMPLIFIER, INTERPRÉTER, PRÉDIRE et REPRÉSENTER mettent davantage en relation le MOE avec le MTM. Néanmoins, la configuration est différente pour certaines tâches épistémiques selon les séquences. Au registre du MTM, on peut inclure les tâches épistémiques COMPARER, DÉCRIRE, DÉDUIRE, ÉVALUER et SÉLECTIONNER dans la séquence d'enseignement 1 et au registre du MOE, on peut inclure les tâches

épistémiques ARGUMENTER, DÉCRIRE, ÉVALUER, GÉNÉRER et SÉLECTIONNER dans la séquence d'enseignement 2.

### 3.3.2 *Des configurations significativement différentes selon les facettes de savoir*

Les deux séquences d'enseignement mettent en jeu un nombre important de facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a) qui se manifestent non seulement lors de l'énonciation des définitions formelles des savoirs disciplinaires par l'enseignant, mais par des énoncés formulés par l'enseignant, les élèves ou conjointement par ces deux acteurs tout au long des séquences à travers diverses tâches épistémiques. La fréquence d'apparition de ces petits éléments de savoir formulés dans le langage de ces acteurs qui sont « une tentative d'organiser la compréhension conceptuelle des phénomènes »<sup>118</sup> (Minstrell, 1992b) est sensiblement la même dans les deux séquences d'enseignement : 650 facettes de savoir dans la séquence d'enseignement 1 qui s'étale sur 11 séances et 745 facettes de savoir dans la séquence d'enseignement 2 qui s'étale sur 14 séances. Toutefois, la chronogénèse<sup>119</sup> du savoir (Mercier *et al.*, 2002 ; Sensevy, 2007 ; Sensevy et Quilio, 2002) qui se réfère non seulement à la temporalité liée l'introduction des facettes de savoir dans la séquence, mais aussi aux modalités possibles de cette introduction, diffère nettement dans les deux séquences d'enseignement.

En effet, les configurations quant à la distribution des groupes de facettes associées aux concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire (position, déplacement, distance parcourue, vitesse, vitesse moyenne, vitesse instantanée, variation de la vitesse, accélération, accélération moyenne, accélération instantanée, mouvement, mouvement temps, mouvement rectiligne uniforme, mouvement rectiligne uniformément accéléré et mouvement balistique) sont nettement différentes dans les deux séquences. Dans la séquence d'enseignement 1, la distribution de ces groupes de facettes ne se fait pas de manière continue sur l'ensemble des séances, ceux-ci se distribuant essentiellement sur les séances 1, 2, 5, 7, 9, 10 et 11.

---

<sup>118</sup> Traduction libre : The Facet Codes are our attempt to organize the phenomena of students' conceptual understanding. » (Minstrell, 1992b)

<sup>119</sup> Rappelons que la chronogénèse « pose la question du quand ? Plus précisément comment quand ? Elle incite à identifier la nature et les raisons du passage, à un certain moment, d'un contenu épistémique à un autre » (Sensevy, 2007, p. 32).

Dans la séquence d'enseignement 2, la distribution de ces groupes de facettes se fait d'une manière relativement continue sur l'ensemble des séances, même si ceux-ci font l'objet d'une plus grande introduction dans la seconde moitié de la séquence, dans les séances à 7 à 14, qui couvrent les phases *Conceptualiser et Déployer* de la démarche de modélisation lors de la présentation des laboratoires.

La progression du savoir sur le plan thématique met en évidence une variabilité importante d'introduction des facettes selon les thèmes disciplinaires abordés. Dans la séquence d'enseignement 1, le thème 2-Vecteurs qui couvre plusieurs séances (3, 4, 6 et 8) n'est pas riche en termes d'introduction de facettes dans le domaine de la cinématique tandis que les groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION, MRU ET MRUA prédominent quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence, lesquelles comportent au moins le double du nombre de facettes par rapport aux autres groupes. Dans la séquence d'enseignement 2, les groupes de facettes MRU, MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE prédominent largement sur les autres groupes de facettes quant à leur fréquence d'apparition totale sur la séquence. Par ailleurs, dans les deux séquences d'enseignement, les groupes de facettes se distribuent dans des proportions variables selon les thèmes disciplinaires retenus par l'enseignant et certains thèmes disciplinaires mobilisent davantage de groupes de facettes particuliers. Dans la séquence d'enseignement 1, le thème 1-Variables du mouvement mobilise essentiellement les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, ACCÉLÉRATION ; le thème 3-MRU mobilise essentiellement les groupes de facettes VITESSE et MRU ; et le thème 4-MRUA mobilise essentiellement les groupes de facettes ACCÉLÉRATION et MRUA. Dans la séquence d'enseignement 2, le thème 1-MRU mobilise essentiellement le groupe de facettes VITESSE ; le thème 2-MRUA mobilise essentiellement le groupe de facette MRUA, le thème 3-MRU et MRUA mobilise essentiellement les groupes de facettes MRU et MRUA et le thème 4-Mouvement balistique mobilise essentiellement le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE. Ainsi, les deux séquences d'enseignement présentent une cohérence conceptuelle importante dans l'introduction des facettes de savoir en relation avec les thèmes disciplinaires retenus.

Un autre indicateur de la progression chronogénétique qui permet de caractériser les deux séquences d'enseignement est la densité du savoir (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et*

*al.*, 2007b). Cet indicateur, qui est associé à la continuité du savoir, met en plus en évidence la continuité du savoir selon des échelles de temps. Il apparaît que la densité des groupes de facettes<sup>120</sup>, c'est-à-dire le nombre de facettes introduites d'un même groupe à l'heure dans une séance (tous thèmes confondus), diffère grandement à l'intérieur d'une même séquence d'enseignement, d'une part, et entre les deux séquences d'enseignement, d'autre part. Dans la séquence d'enseignement 1, les deux premières séances sont très denses pour les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE ET VARIATION DE LA VITESSE et ACCÉLÉRATION ; la séance 7 est très dense pour le groupe de facettes MRU ; et les séances 10 et 11 sont très denses pour le groupe de facettes MRUA. Dans la séquence d'enseignement 2, si nous ne considérons que la seconde moitié des séances de cette séquence (là où les facettes de savoir sont plus particulièrement introduites), il apparaît que : les séances 7 et 8 sont très denses pour le groupe de facettes MRU ; les séances 9, 10, 11 et 12 sont très denses pour les groupes de facettes MRUA ; et que la séance 10 est très dense pour le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE avec une densité exceptionnelle de 120 facettes à l'heure.

Par ailleurs, notre analyse de la densité des groupes de facettes selon les thèmes disciplinaires met en évidence une grande variabilité de la densité de ces groupes de facettes à l'intérieur d'une même séquence d'enseignement, d'une part, et entre les deux séquences d'enseignement, d'autre part. Dans la séquence d'enseignement 1, les groupes de facettes DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE et ACCÉLÉRATION sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1-Variables du mouvement, les groupes de facettes VITESSE et MRU sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3-MRU, et les groupes de facettes Accélération et MRUA sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 4-MRUA. Globalement, au niveau de cette séquence (tous les thèmes disciplinaires confondus), quatre groupes de facettes se démarquent des autres quant à leur plus grande densité moyenne. Il s'agit des groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION, MRU et MRUA dont les densités moyennes sont nettement supérieures aux autres groupes. Dans la séquence

---

<sup>120</sup> Nous établissons le degré de densité des groupes de facettes de savoir selon les séances ou les thèmes disciplinaires sur la séquence (ensemble des séances) avec l'échelle suivante : densité très faible [ 0, 10 [ ; densité faible [ 10, 20 [ ; densité moyenne [ 20, 30 [ ; densité forte [ 30, 40 [ ; densité très forte [ 40 et +.

d'enseignement 2, les groupes de facettes VITESSE et MRU sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 1-MRU ; le groupe de facettes MRUA est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 2-MRUA ; les groupes de facettes MRU et MRUA sont plus denses que les autres groupes de facettes dans le thème 3-MRUA et MRUA ; et le groupe de facettes MOUVEMENT BALISTIQUE est plus dense que les autres groupes de facettes dans le thème 4- Mouvement balistique. Aucun groupe de facettes de cinématique n'est cependant mobilisé dans le thème 5-Mouvement pendulaire. Globalement, au niveau de la séquence (tous thèmes disciplinaires confondus), un seul groupe de facettes, le groupe de facettes MRUA, se démarque nettement des autres quant à sa plus grande densité moyenne. Ces configurations différentes des pratiques d'enseignement quant à la densité du savoir permet de mettre en évidence que le rythme d'introduction des éléments de savoir dans la séquence d'enseignement 1 est davantage irrégulier alors que dans la séquence d'enseignement 2, le rythme d'introduction des éléments de savoir se fait plus régulièrement, ce qui favoriserait davantage les apprentissages conceptuels chez les élèves (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b).

Sur le plan du contexte de traitement des thèmes disciplinaires, les deux séquences se distinguent nettement. Alors que dans la séquence d'enseignement 1 les groupes de facettes sont essentiellement introduits dans des moments de théorisation (pour les groupes de facettes POSITION, DÉPLACEMENT, VITESSE, VARIATION DE LA VITESSE, MRU et MRUA) ou dans des moments d'exercisation (pour les groupes de facettes DISTANCE PARCOURUE, ACCÉLÉRATION et MOUVEMENT) dans la séquence d'enseignement 2, tous les groupes de facettes de savoir sont introduits dans la présentation ou la réalisation ou des laboratoires, et plus particulièrement dans ce dernier contexte sauf pour le groupe de facettes ACCÉLÉRATION dont les facettes font l'objet d'une introduction plus importante dans les moments de réalisation du laboratoire. Contrairement à la séquence d'enseignement 1, dans la séquence d'enseignement 2, la fréquence d'apparition des facettes de savoir est beaucoup plus faible dans les moments de théorisation menés par l'enseignant. Ces configurations différentes des pratiques d'enseignement quant aux contextes de traitement des thèmes disciplinaires montrent que l'enseignant 2 accorde une place importante aux laboratoires pour la construction des facettes de savoir en jeu dans la modélisation et la compréhension des phénomènes du monde matériel, alors que l'enseignante 1 accorde une priorité à la théorie et aux exercices pour cette même finalité.

Nos analyses mettent en évidence que les pratiques d'enseignement des deux enseignants se distinguent sur le plan de la source d'émergence des facettes de savoir et montrent une variabilité importante de cet indicateur selon les groupes de facettes dans les deux classes. Dans la séquence d'enseignement 1, les facettes de ces groupes de savoirs émergent en grande partie de manière décontextualisée, de situations fictives ou de ressources didactiques. Dans cette séquence d'enseignement, les groupes de facettes POSITION, DISTANCE PARCOURUE, DÉPLACEMENT, VARIATION DE LA VITESSE sont ceux dont les facettes de savoir émergent le plus souvent à travers des situations fictives ; les groupes de facettes VITESSE, ACCÉLÉRATION et MRU sont ceux dont les facettes de savoir émergent de manière décontextualisée ou à travers des situations fictives dans une proportion égale ; et les facettes de savoir du groupe de facettes MRUA émergent davantage des ressources didactiques. Dans une moindre proportion, nous repérons, dans la plupart des groupes de facettes qui émergent de démonstrations expérimentales ou de situations expérimentales. Dans la séquence d'enseignement 2, la configuration est toute autre : les facettes du groupe VITESSE sont celles qui émergent le plus souvent de manière décontextualisée ; les facettes du groupe DISTANCE PARCOURUE sont celles qui émergent le plus souvent de situations fictives ; les facettes du groupe MOUVEMENT BALISTIQUE sont celles qui émergent le plus souvent de ressources didactiques et les facettes des groupes ACCÉLÉRATION, MRU et MRUA sont celles qui émergent le plus souvent de situations expérimentales. Ces différences de configuration entre les deux séquences montrent que c'est davantage dans la classe de l'enseignant 2 que les facettes de savoir émergent au sein des situations expérimentales, c'est-à-dire de situations empiriques dans lesquelles les élèves recueillent et organisent des données en vue de la modélisation et de la compréhension des phénomènes de la physique. De notre point de vue, l'engagement des élèves dans les situations expérimentales favorise plus l'acquisition des savoirs conceptuels que si les savoirs sont construits de manière décontextualisée ou par le biais du manuel scolaire. Ce sont de telles situations qui permettent aux élèves de procéder à des expériences mesurables sur des phénomènes en sélectionnant des objets et événements appropriés pour étudier ces phénomènes, d'une part, et de sélectionner et traiter les éléments théoriques correspondant aux objets et événements étudiés en vue de décrire avec les mots de la physique les phénomènes étudiés, d'autre part (Veillard, Tiberghien et Vince, 2011). C'est en ce sens que Veillard, Tiberghien et Vince (2011), en s'appuyant sur Hacking (2005/1983), stipulent qu'en physique, les expérimentations, qu'elles soient initiées par des hypothèses théoriques ou par des observations dans le monde réel,

sont des activités fondamentales dans toute formation scientifique et ne peuvent être remplacés par des descriptions écrites.

Sur le plan des phases de la démarche de modélisation, les deux séquences se distinguent nettement en ce sens que dans la séquence d'enseignement 1, les facettes des divers groupes de facettes sont en grande partie introduites en marge d'une démarche de modélisation. Seuls les groupes Vitesse, Mouvement et MRUA comportent des facettes introduites dans les phases *Problématiser*, *Investiguer* et *Conceptualiser et déployer* d'une démarche de modélisation. A contrario, dans la séquence d'enseignement 2 les groupes de facettes sont principalement introduits dans le cadre d'une démarche de modélisation, et plus particulièrement dans la phase *Conceptualiser et déployer*. Seules quelques facettes des groupes MRUA et MOUVEMENT BALISTIQUE sont introduites dans la phase de problématisation de cette démarche.

Sur le plan des types de facettes de savoir (Galili et Hazan, 2000 ; Malkoun, 2007 ; Minstrell, 1992a, 1992b ; Tiberghien *et al.*, 2007a) en jeu, les deux séquences se caractérisent par une prédominance des facettes de savoir conceptuelles dans la plupart des groupes de facettes. Deux autres types de facettes, les facettes SYMBOLIQUES-ALGÈBRIQUES et les facettes SYMBOLIQUES-GRAPHIQUES, présentent également une fréquence d'apparition très importante dans les deux séquences. Dans les deux séquences, le savoir n'est donc pas seulement d'ordre conceptuel, puisqu'il mobilise d'autres registres de représentation sémiotique ce qui est favorable aux apprentissages.

Enfin, pour ce qui est de notre dernier indicateur d'ordre microscopique, celui de la position des acteurs de la classe dans la formulation des facettes de savoir, ce que certains auteurs appellent la topogénèse (Chevallard, 1999 ; Mercier *et al.*, 2002) ou la répartition des responsabilités par rapport au savoir (Cobb, Gresalfi et Hodge, 2006 ; Mortimer et Scott, 2003 ; Scott *et al.*, 2006), celle-ci se distingue nettement dans les deux séquences. Dans la séquence d'enseignement 1, la responsabilité pour la prise en charge des facettes de savoir est largement du côté de l'enseignante pour tous les groupes de facettes, sauf pour le groupe de facettes MRUA où la configuration est différente de celle des autres groupes : la responsabilité est davantage du côté des élèves ou partagée entre l'enseignante et les élèves. Dans la séquence d'enseignement 2, cette responsabilité

est, au contraire, largement du côté des élèves ou elle est partagée entre l'enseignant et les élèves, et ce, pour tous les groupes de facettes. À la suite de Tiberghien et ses collègues (Tiberghien et Malkoun, 2007 ; Tiberghien *et al.*, 2007b), nous postulons que c'est dans la classe de l'enseignant 2 que les élèves ont plus de chance de comprendre et s'approprier le savoir en jeu, car c'est dans cette séquence qui offre la plus grande opportunité aux élèves de participer activement à la formulation des facettes de savoir. Ces différences de configuration quant à la prise en charge des facettes de savoir dans les deux séquences met en évidence que les savoirs en jeu dans les processus de modélisation émergent davantage d'un dispositif d'enseignement-apprentissage s'inscrivant dans une logique transmissive dans la première séquence alors qu'ils émergent davantage d'un dispositif d'enseignement-apprentissage s'inscrivant dans une logique constructiviste dans la seconde séquence.

#### **4. SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA DIMENSION ORGANISATIONNELLE CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS**

##### **4.1 Quels défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves ?**

Du côté des élèves, notre analyse des pratiques d'enseignement permet de dégager une difficulté commune associée à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation dans les classes des deux enseignants. Cette difficulté qui concerne des savoirs procéduraux est l'analyse et la construction de représentations tabulaires, algébriques, graphiques ou vectorielles. Dans les deux classes, les élèves ont de la difficulté à :

- construire des représentations graphiques issues de données expérimentales (nuages de point), notamment lorsque les intervalles de temps sont fractionnaires ;
- décrire, interpréter, exemplifier ou prédire des tracés de graphiques position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps de mobiles en MRU ou en MRUA ;
- effectuer des conversions entre des représentations graphiques du mouvement de mobiles en MRU ou en MRUA, notamment entre les graphiques vitesse-temps et distance-temps et entre les graphiques accélération-temps et vitesse-temps au moyen du calcul d'aire sous la courbe ;
- déduire des formules mathématiques de graphiques position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps de mobiles en MRU ou en MRUA ;



- effectuer des opérations algébriques ou vectorielles, par exemple calculer des grandeurs physiques de vitesse et d'accélération (moyenne ou instantanée) à partir de données graphiques, composer un vecteur, construire des schémas vectoriels représentant un système de forces.

Les autres défis ou difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves sont rapportés exclusivement par l'un ou l'autre des deux enseignants. L'enseignante 1 pointe du doigt la faible compréhension des savoirs conceptuels chez plusieurs élèves de sa classe. Notre analyse de la pratique d'enseignement de cette enseignante met en évidence à plusieurs reprises la faible compréhension de certains élèves quant aux concepts de déplacement, de distance parcourue, de vitesse scalaire (instantanée et moyenne), de vitesse vectorielle (instantanée, moyenne, constante), d'accélération (notamment pour les unités de mesure associées à accélération), de mouvement uniforme et de mouvement accéléré, de mouvement rectiligne uniforme et de mouvement rectiligne uniformément accéléré. Si la faible compréhension des savoirs conceptuels n'a pas été rapportée par l'enseignant 2 dans les entrevues pré et postenregistrement, nous avons tout de même repéré à certaines reprises, des difficultés de ce type dans la classe de cet enseignant, mais dans une fréquence beaucoup moins importante que dans la classe de l'enseignante 1. Il s'agissait plus particulièrement de difficultés liées à la compréhension du mouvement rectiligne uniformément accéléré ou du mouvement balistique.

En réponse à la question des défis ou difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves, l'enseignant 2 en rapporte une dizaine de plus que l'enseignante 1.

- La complexité des modèles (MRU, MRUA, MB, MP) sous-jacents aux phénomènes physiques à l'étude : la modélisation de mobiles en mouvement balistique qui nécessite de prendre en considération les composantes verticale et horizontale du mouvement, la modélisation de mobiles en mouvement sur des plans inclinés qui nécessite la construction de représentations vectorielles, etc. ;
- L'engagement des élèves dans une démarche de modélisation ouverte où ils sont appelés à concevoir des protocoles, sélectionner et manipuler des facteurs expérimentaux, assumer les choix retenus et défendre des résultats obtenus par des manipulations qui ne sont pas toujours menées de manière rigoureuse ;
- L'utilisation des nouveaux matériels de laboratoire pour le recueil de données (sondes photoélectriques, logiciels, etc.) au point de départ de la démarche de modélisation ;
- L'identification et la reconnaissance de facteurs expérimentaux pouvant avoir une influence ou non sur le phénomène étudié : identification et reconnaissance de facteurs expérimentaux plausibles et acceptabilité de facteurs expérimentaux retenus n'ayant aucune influence sur leur phénomène ;
- L'absence de rigueur dans la manipulation des variables expérimentales : forte tendance des élèves à faire varier plus d'un facteur à la fois lors de manipulations expérimentales ;

- La mise en relation entre le monde expérimental et le monde théorique : explication des résultats d'expériences des phénomènes étudiés avec le langage théorique et évaluation des résultats expérimentaux obtenus à la lumière de résultats théoriques ;
- L'établissement de liens intradisciplinaires (dans le champ de la physique) ou interdisciplinaires (avec d'autres disciplines scolaires) pour la bonne mise en œuvre des laboratoires, plus particulièrement entre la physique et les mathématiques pour la modélisation mathématique des phénomènes ;
- L'accessibilité au savoir théorique de référence dans diverses ressources, notamment dans les ressources en ligne qui ne sont pas toujours en relation avec le phénomène étudiées et qui sont rarement adaptées aux élèves ;
- La difficulté d'exploiter judicieusement les ressources théoriques consultées : sélection d'informations pertinentes et capacité à résumer ou vulgariser les contenus proposés sur des ressources en ligne ;
- La présentation des laboratoires dans la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation : développement de contenus disciplinaires, recherche de stratégies visuelles qui permettent de mettre en évidence les modèles sous-jacents aux phénomènes physiques étudiés ; proposition et résolution de problèmes d'application permettant d'approfondir les concepts et modèles en jeu, etc. ;
- Le temps à disposition pour la réalisation des laboratoires et la préparation à la présentation de leur laboratoire.

Dans l'expression des défis ou difficultés associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté des élèves rapportés exclusivement par les deux enseignants, on peut constater deux tendances : l'enseignante 1 évoque des défis ou difficultés d'ordre conceptuel liés à la compréhension des savoirs conceptuels en jeu dans la modélisation des phénomènes alors que l'enseignant 2 évoque plutôt des défis ou difficultés d'ordre procédural liés à la mise en œuvre d'une démarche de modélisation prise en charge par les élèves, défis ou difficultés qui touchent l'une ou l'autre des quatre phases de cette démarche. Nos observations de la pratique d'enseignement l'enseignante 1 (pratique observée par le chercheur) confirment la présence de plusieurs difficultés liées à la compréhension des savoirs conceptuels chez les élèves de cette classe. Elles dépassent largement celles déclarées par l'enseignante, tant au niveau qualitatif que quantitatif. Il apparaît que plusieurs élèves de cette classe ont une faible compréhension des concepts de distance parcourue, de déplacement, de vitesse scalaire ou vectorielle (instantanée, moyenne, constante), d'accélération scalaire ou vectorielle (instantanée, moyenne, constante) et des modèles du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Nos observations de la pratique d'enseignement de cette l'enseignante montrent par ailleurs des difficultés importantes associées à l'analyse et la construction de graphiques et de formules mathématiques chez les élèves. Ces dernières concernent notamment la représentation, la description, l'interprétation, l'exemplification ou encore la prédiction de tracés de graphiques position-temps, vitesse-temps ou accélération-temps de mobiles en MRU ou MRUA.

## 4.2 Quels défis et difficultés associées à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation du côté de l'enseignant ?

Du côté de l'enseignant, nous avons dégagé trois défis communs associés à l'enseignement des modèles et de la démarche de modélisation chez les deux enseignants. Le premier défi est de conjuguer avec les caractéristiques psychopédagogiques des élèves. À ce sujet, l'enseignante 1 pointe du doigt le faible niveau de compréhension des élèves en mathématiques et explique que cela a des conséquences importantes sur la progression du savoir en physique, car les contenus disciplinaires de mathématique sont largement mobilisés en physique. Quant à l'enseignant 2, il soutient l'importance de proposer aux élèves des laboratoires qui se situent dans leur zone proximale de développement en affirmant que les élèves doivent être engagés dans l'étude de phénomènes physiques dont la modélisation implique le recours à des modèles mathématiques dont la complexité ne va pas au-delà des objectifs du programme de mathématique.

Le second défi concerne la gestion du travail des élèves. L'enseignante 1 pointe du doigt le recours à des stratégies d'enseignement qui peuvent contribuer à la compréhension des savoirs disciplinaires à enseigner chez tous les élèves considérant la « grande disparité psychologique » entre eux. À ce sujet, elle évoque la nécessité d'identifier au préalable la nature des blocages chez les élèves qu'elles distinguent entre deux catégories : les blocages conceptuels liés à la compréhension des concepts de physique ou de mathématique et les blocages procéduraux liés à la capacité des élèves à effectuer des opérations formelles. Puis, elle fait référence à des stratégies qui permettent aux élèves de dépasser ces obstacles, par exemple recourir à des représentations visuelles pour mieux comprendre l'évolution d'un phénomène, appliquer intégralement l'ensemble des étapes d'une démarche de résolution de problèmes, etc. Quant à l'enseignant 2, le défi qui est de loin le plus prédominant dans son discours est la gestion du travail des élèves dans le cadre d'une démarche de modélisation ouverte. À ce sujet, il met en exergue l'exigence de son rôle et de ses tâches dans une démarche de modélisation ouverte : accompagner les élèves dans la réalisation de laboratoires diversifiés de manière à ce qu'ils puissent atteindre les objectifs ciblés tout en leur laissant une grande marge de manœuvre ; gérer les aspects affectifs en prévenant les difficultés importantes et en encourageant les élèves ; s'assurer que les élèves mobilisent, comprennent et mettent en évidence les principaux modèles en jeu dans l'étude des phénomènes physiques ;

participer de manière active à les présentations des laboratoires en faisant ressortir les contenus disciplinaires essentiels et en veillant à la validité des contenus transmis par les élèves ; etc. Il précise que ce type de démarche, son rôle et ses tâches dépassent largement celui d'un enseignement traditionnel de la physique qui consiste exposer magistralement des contenus, proposer aux élèves des exercices préalablement sélectionnés et les engager des laboratoires dont les protocoles sont déjà fournis comme des recettes à suivre.

Enfin, le troisième défi commun aux deux enseignants est de nature logistique, mais il rassemble des idées différentes chez ces deux acteurs. L'enseignante 1 évoque la faible disponibilité de ressources matérielles qui puissent permettre aux élèves de se donner une compréhension plus approfondie du mouvement de mobiles par l'analyse de leurs variables respectives (position, vitesse et accélération). À ce sujet, elle cite plus particulièrement le logiciel de simulation informatique *Labquest* (celui utilisé par l'enseignant 2) qui permet de simuler de manière dynamique le mouvement d'un mobile tout en faisant la construction de ses graphiques. Pourtant, ce logiciel est connu et utilisé par plusieurs enseignants de physique québécois. Elle évoque par ailleurs la contrainte temporelle avec laquelle elle doit composer pour couvrir l'ensemble de son programme en considérant la nature des activités prévues (certaines sollicitent parfois un temps important pour les explications en plénière et un temps moindre pour le travail en équipe). Quant à l'enseignant 2, son défi de nature logistique consiste à s'assurer du bon fonctionnement du système informatique, des outils et instruments de mesure que les élèves doivent utiliser pour le recueil des données dans leur laboratoire.

#### **4.3 Quels facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?**

Dans les entrevues postenregistrement, nous avons demandé aux enseignants d'identifier des facteurs qui facilitent et entravent l'enseignement et l'apprentissage des modèles et des démarches visant l'acquisition des modèles. Quatre facteurs communs facilitant l'enseignement et l'apprentissage de ces objets d'étude ont émergé du discours des enseignants.

Le premier facteur est l'apprentissage de savoirs préalables. Une introduction au concept de vecteur et au calcul vectoriel au début de l'apprentissage de la mécanique facilite la modélisation du mouvement de mobiles se déplaçant dans un référentiel à deux dimensions selon l'enseignante 1 alors que la connaissance préalable des principaux modèles mathématiques (relation linéaire, relation du second degré, relation exponentielle, etc.) favorise grandement l'apprentissage des modèles physiques à l'étude selon l'enseignant 2.

Le second facteur est le recours à des dispositifs matériels concrets visant à concrétiser matériellement la modélisation des phénomènes physique, par exemple le charriot de laboratoire pour modéliser le mouvement rectiligne uniforme dans le cadre de démonstrations expérimentales ou une table à coussin d'air pour modéliser ce même mouvement dans le cadre d'une situation expérimentale.

Le troisième facteur concerne le recours à des ressources informatiques textuelles ou visuelles (vidéos explicatives, simulations informatiques, etc.) qui permettent de visualiser les phénomènes. À ce sujet, dans le cadre de situations fictives menées en groupe-classe au terme de sa séquence d'enseignement, l'enseignante 1 effectue à plusieurs reprises des simulations informatiques afin de consolider les acquis des élèves sur les modèles du mouvement rectiligne uniforme et du mouvement rectiligne uniformément accéléré. Ces simulations virtuelles permettent de construire de manière dynamique les tracés des graphiques position-temps, vitesse-temps et accélération-temps d'une voiture qui se déplace sur un référentiel horizontal. Dans la classe de l'enseignant 2, ce n'est pas l'enseignant, mais plutôt les élèves qui recourent à de telles simulations. Dans plusieurs laboratoires, les élèves sont appelés à recueillir, dans les phases de problématisation et d'investigation de la démarche de modélisation, des données position-temps d'un mobile au moyen de sondes photoélectriques *Pasco*. Via une interface, ces données sont représentées graphiquement à l'aide du logiciel *Labquest*.

Enfin le quatrième facteur facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation rapporté par les deux enseignants est le recours à l'interdisciplinarité. Par exemple, pour expliquer le concept de la vitesse instantanée, l'enseignante 1 s'appuie sur le concept de vitesse d'une réaction chimique en chimie. Quant à l'enseignant 2, il préconise un

enseignement interdisciplinaire physique-mathématique dans lequel les enseignants de physique et de mathématique proposent aux élèves des situations qui permettent d'appréhender des phénomènes réels et non des situations purement fictives, d'une part, et dont les contenus de chacune de ces disciplines peuvent être mobilisés dans la discipline partenaire.

Deux autres facteurs facilitant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation sont rapportés exclusivement par chacun des enseignants. Ces facteurs concernent pour l'enseignante 1 la possibilité pour les élèves de comparer des représentations graphiques de position-temps, vitesse-temps et accélération-temps de mobiles MRU ou en MRUA afin de faciliter la compréhension de ces modèles du mouvement, d'une part, et l'enseignement auprès d'un groupe d'élèves dont la taille est réduite, d'autre part. Quant à l'enseignant 2, il rapporte la possibilité offerte aux élèves de résoudre des problèmes d'application en vue d'appliquer les modèles déjà vus dans d'autres contextes, ce qui leur permet d'approfondir et d'élargir leur compréhension des modèles étudiés. C'est pourquoi ils sollicitent les élèves à proposer de tels problèmes à leurs pairs dans la phase *Conceptualiser et déployer* de la démarche de modélisation. Enfin, il évoque l'accès à des ouvrages de référence, autres que les manuels scolaires, qui présentent des contenus disciplinaires vulgarisés et accessibles psychologiquement aux élèves.

#### **4.4 Quels facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ?**

Deux facteurs communs entravant l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation ont émergé du discours des enseignants. Le premier facteur est la faible compréhension des savoirs disciplinaires chez certains élèves. À ce sujet, l'enseignante 1 pointe du doigt l'utilisation adéquate de référentiels pour décrire le mouvement de mobiles au moyen des signes du déplacement, de la vitesse et de l'accélération et l'enseignant 2 évoque la faible compréhension de la notion de modèle en sciences chez certains élèves qui ne distinguent pas entre un modèle scientifique et un modèle mathématique. Le second facteur qui est de nature logistique concerne la non-disponibilité de certaines ressources matérielles (notamment des logiciels de simulation) et le temps restreint à disposition pour couvrir l'ensemble des contenus disciplinaires

du programme. Dans le discours de l'enseignante 1, ce facteur semble justifier la faible place qu'elle accorde aux élèves pour leur engagement dans des laboratoires. Quant à l'enseignant 2, il affirme : « La plus grosse contrainte dans mon enseignement des modèles est de nature logistique. Elle est liée au bon fonctionnement de mon système informatique ».

En outre, l'enseignant 2 rapporte trois autres facteurs entravant l'enseignement et l'apprentissage de ces objets d'étude : 1) la faible qualité des matériels didactiques produits par les maisons d'édition, notamment pour la non-validité des solutionnaires fournis aux élèves en raison de la présence d'un nombre important d'erreurs et la non-uniformité du langage adoptée par les maisons d'édition quant aux conventions d'écriture mathématique ; 2) le niveau non approprié des ressources informatiques en ligne, celles-ci étant rarement vulgarisées pour les élèves du secondaire ; 3) un enseignement des mathématiques décontextualisé qui n'aide pas à la mobilisation des concepts de mathématiques dans l'enseignement de la physique. Soulignons enfin qu'aucun des deux enseignants n'a évoqué ses propres compétences professionnelles comme facteur pouvant faciliter ou entraver l'enseignement et l'apprentissage des modèles et de la démarche de modélisation en classe de physique. Or, nous pensons que la formation initiale ou continue des enseignants peut constituer un facteur facilitant ou aggravant les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation.

#### **4. SYNTHÈSE ET DISCUSSION RELATIVE À LA RELATION ENTRE PRATIQUES D'ENSEIGNEMENT ET ACQUISITIONS CONCEPTUELLES CHEZ LES DEUX ENSEIGNANTS**

L'enquête sur les connaissances de base des élèves dans le domaine de la cinématique a permis de sonder la compréhension conceptuelle des élèves dans le cadre de situations matérielles mettant en jeu divers modèles du mouvement, tout en décomposant les concepts en jeu, ce qui rejoint notre hypothèse quant à l'apprentissage par « petits éléments de savoir » en physique. Ce questionnaire comportant 27 questions à choix multiples a été administré au terme des séquences d'enseignement porte sur divers concepts et modèles prescrits dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire, soient les concepts de position, de distance, de déplacement, de trajectoire, de vitesse (moyenne et instantanée), de variation de la vitesse, d'accélération (moyenne et instantanée) et les modèles du mouvement rectiligne uniforme, du mouvement rectiligne uniformément accéléré

(chute libre et plan incliné) et du mouvement balistique exprimés dans les registres de représentation algébrique, graphique et vectoriel.

Les **tableaux 93 et 94** présentent de manière synthétique les matrices des relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves en cinématique dans les deux séquences d'enseignement. Ces matrices qui résultent des matrices des facettes de savoir simplifiées développées dans la section 9.1 sont structurées autour de six indicateurs d'ordre microscopique dont les modalités sont décrites dans la légende associée à ces tableaux : la fréquence d'apparition totale des facettes de savoir dans la classe *i* (Fi), la continuité des facettes de savoir dans la classe *i* (Csi), le contexte de traitement des thèmes disciplinaires dans la classe *i* (Cti), la source d'émergence des facettes de savoir dans la classe *i* (Si), l'ancrage des facettes de savoir dans les phases de la démarche de modélisation dans la classe *i* (Phi), la prise en charge des facettes de savoir dans la classe *i* (Pci). Ces indicateurs d'ordre microscopique sont mis en relation avec le pourcentage de réussite des élèves dans la classe *i*. Plus précisément, la légende pour interpréter ces deux matrices est la suivante.

**Fi** : Fréquence d'apparition totale des facettes savoir dans la classe *i*

**Csi** : Continuité des facettes de savoir dans la classe *i* avec les modalités Continuité faible(Cfa), Continuité moyenne(Cm), Continuité forte(Cfo), Continuité très forte (Ctf)

**Cti** : Contexte de traitement des thèmes disciplinaires dans la classe *i* avec les modalités Exercices-réalisation (ER), Exercices-correction(EC), Laboratoire-explications(LE), Laboratoire-explications générales(LEG), Laboratoire-explications spécifiques (LES), Laboratoire-réalisation(LR), Laboratoire-correction(LC), Laboratoire-présentations(LP), Théorisation(T)

**Si** : Source d'émergence des facettes de savoir dans la classe *i* avec les modalités Décontextualisée(D), Ressources didactiques(RD), Démonstration expérimentale (DE), Situation fictive(SF) et Situation expérimentale(SE)

**Phi** : Phases de la démarche de modélisation dans la classe *i* avec les modalités Hors démarche(HD), Problématiser(PR), Planifier(PL), Investiguer(I), Conceptualiser et Déployer (CD)

**Pci** : Prise en charge des facettes de savoir dans la classe *i* avec les modalités Prise en charge essentiellement par l'enseignant (P), Prise en charge essentiellement par les élèves (E), Prise en charge essentiellement conjointe par l'enseignant et les élèves (PetE)

**Ri** : Pourcentage de réussite des élèves dans la classe *i*

Score plus élevé chez les élèves de la classe 1
Score plus élevé chez les élèves de la classe 2
Questions considérées pour des fins d'analyse

**A** : Relation explicative plus complexe

Ces tableaux mettent en évidence que les élèves de la classe 2 ont obtenu dans 70 % des questions (19 questions sur 27) un score plus élevé que ceux des élèves de la classe 1. Si nous ne considérons que les questions où les matrices comportent des facettes de savoir dans les deux séquences (les 19 questions dont la trame de fond est grisée), nous remarquons que pour environ les 2/3 de ces questions (12 questions sur 19, soit les questions 4, 5, 6, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19,



20 et 21), le pourcentage de réussite des élèves est plus élevé dans la classe où il y a une plus grande fréquence d'apparition totale des facettes savoir, et où il y a présence d'un nombre plus important de facettes de savoir dont la continuité dépasse la très faible continuité, c'est-à-dire dont la continuité est faible, moyenne, forte ou très forte. En effet, ces deux indicateurs ne peuvent expliquer à eux seuls une meilleure acquisition conceptuelle chez élèves, car pour 1/3 de ces questions (7 questions sur 19, soit les questions 2, 3, 8, 10, 13, 15 et 22) (celles dont fréquence d'apparition totale des facettes savoir est indiquée en rouge), nous constatons la relation inverse. Ainsi, quatre autres indicateurs pourraient contribuer à favoriser ces acquisitions conceptuelles en prenant des modalités particulières. En effet, pour la plupart de ces questions, nous observons que les scores sont plus élevés dans les classes où : le contexte de traitement des thèmes disciplinaires prend les modalités Laboratoire-réalisation (LR) ou Laboratoire-présentations (LP) plutôt que les modalités Exercices-réalisation (ER), Exercices-correction(EC) ou Théorisation(T) ; la source d'émergence des facettes de savoir prend la modalité Situation expérimentale(SE) plutôt que les modalités Décontextualisée(D), Ressources didactiques(RD), Démonstration expérimentale (DE), Situation fictive(SF) ; l'ancrage des facettes de savoir dans les phases de la démarche de modélisation prend les modalités Investiguer(I), Conceptualiser et Déployer (CD) plutôt que la modalité Hors démarche(HD) ; la prise en charge des facettes de savoir prend les modalités Prise en charge essentiellement par les élèves (E) ou Prise en charge essentiellement conjointe par l'enseignant et les élèves (PetE) plutôt que la modalité Prise en charge essentiellement par l'enseignant (P). On peut toutefois relever deux exceptions dans le cas des questions 15 et 22 où les élèves de la classe 1 ont obtenu des scores plus élevés que les élèves de la classe 2 même si les facettes de savoir dans la classe 2 présentent une fréquence d'apparition totale plus grande, comporte davantage de facettes dont la continuité est moyenne, sont introduites dans des laboratoires au sein de situations expérimentales dans la phase *Investiguer* ou *Conceptualiser et Déployer* d'une démarche de modélisation et qu'elles sont davantage prises en charge par les élèves.

Si la plupart des résultats mettant en relation les pratiques d'enseignement aux acquisitions conceptuelles des élèves montrent que les éléments de savoir sont mieux appris que d'autres en raison d'une introduction (une fréquence d'apparition) plus importante dans la classe, en revanche, l'apprentissage d'autres éléments de savoir ne peut s'expliquer uniquement par cet indicateur. Nous

résultats mettent en évidence d'autres indicateurs, plus particulièrement le contexte de traitement des thèmes disciplinaires dans lequel les facettes de savoir prennent ancrage, la source d'émergence des facettes de savoir, les phases de la démarche de modélisation dans lesquelles les facettes de savoir prennent ancrage et la prise en charge des facettes de savoir dans la classe, peuvent jouer un rôle important sur l'« apprenabilité » (Tiberghien et Makoun, 2007) des éléments de savoir dans le domaine de la physique concerné : celui de la cinématique. Cependant, l'explication d'une meilleure acquisition conceptuelle chez les élèves en relation avec les pratiques d'enseignement des enseignants n'est pas toujours simple, comme nous le montrent les résultats obtenus aux questions 15 et 22. Ces résultats contradictoires pourraient s'expliquer par les « différences d'apprenabilité » des éléments de savoir. À ce sujet, nous faisons l'hypothèse que le coût cognitif associé à l'apprentissage des éléments de savoir en jeu dans ces deux questions est plus élevé que dans les autres questions. Ce coût cognitif pourrait être associé à divers facteurs comme les représentations des élèves (leurs conceptions initiales) ou des conditions d'enseignement particulières que nous n'avons pas étudiées et qui ont une influence importante sur la construction du sens de ces éléments par les élèves. Toutefois, l'hypothèse d'apprentissage que nous avons faite dans le cadre d'analyse à l'effet que les éléments de savoir vont être d'autant mieux appris par les élèves qu'ils sont repris dans le savoir enseigné méritent d'être nuancée, car leur reprise ne conduit pas nécessairement à un meilleur apprentissage, et ce, compte tenu de la diversité possible de « l'apprenabilité » des éléments de savoir dans l'apprentissage de la physique. Ce résultat rejoint celui de plusieurs travaux (Malkoun, 2007 ; Tiberghien et Makoun, 2007 ; Seck, 2008) réalisés par des chercheurs au sein du Laboratoire ICAR de l'École Normale Supérieure de Lyon qui ont analysé les relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la dynamique et qui ont montré qu'une continuité forte de certains éléments du savoir enseigné est liée à leur acquisition, notamment pour les éléments de savoirs plus faciles à acquérir. Enfin, les matrices des facettes de savoir construites autour des différentes questions du questionnaire mettent en évidence la diversité des facettes de savoir en jeu dans la compréhension d'une situation matérielle, d'une part, et mettent en évidence que les éléments de savoir ne s'apprennent pas de manière isolée, mais s'insèrent dans des groupes. Ainsi, nous postulons au plan psychologique qu'une situation matérielle quelconque en physique ne peut être appréhendée que par des éléments des savoirs isolés ou fragmentés, mais plutôt par des grappes d'éléments de savoir.

Tableau 93 : Matrices de relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves en cinématique dans les deux séquences d'enseignement

Q	F1	F2	Cs1	Cs2	Ct1	Ct2	S1	S2	Ph1	Ph2	Pc1	Pc2	R1	R2
1	Comparaison de l'évolution des positions des deux mobiles en chute libre													
	<i>Absence de facettes de savoir pour les deux séquences</i>													89 94*
2	Interprétation de la distance et du déplacement d'un mobile qui se déplace sur une trajectoire horizontale													
	11	7	2Cfa	2Cfa	ER+EC	ER+LR+T	D	SF+SE	HD	CD	P	P+E	59	83*
3	Interprétation de la variation de la position d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps													
	29	13	1Cfa	2Cfa	T	LP	SF+D	SE	HD	CD	P	E+Pet E	81	83*
4	Interprétation de la vitesse d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps													
	19	2	2Cfa	-	ER+EC	ER+LR	SF+D	DetSE	HD	I+CD	P	P	48*	22
5	Reconnaissance du graphique position-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps													
	13	29	1Cfa	2Cfa+ 1Cm	T	LR+LP	SF	SE	HD	I+CD	P	E	57	61*
6	Reconnaissance du graphique accélération-temps d'un mobile initialement au repos qui accélère de façon constante sur un premier intervalle de temps et qui maintient une vitesse constante sur un second intervalle de temps													
	11	22	1Cfa	1Cfa	T	LP	SF	SE	HD	CD	P+PetE	E+Pet E	30	61*
7	Calcul d'une vitesse instantanée d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps													
	<i>Absence de facettes de savoir pour les deux séquences</i>													96 100*
8	Calcul d'une distance parcourue par un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps													
	14	9	2Cfa	1Cfa	EC+T	T	SF+D	SF+SE	HD	CD	P+PetE	P/E	63	89*
9	Calcul d'une vitesse moyenne d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps													
	<i>Absence de facettes de savoir pour la séquence 1</i>													
	24	-	1Cfo	-	T	-	SF+D	-	HD	-	P	-	56	61*
10	Calcul d'une accélération instantanée d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps													
	35	7	3Cm	3Cf	ER+EC+T	LP+T	SF+RD	SFetSE	HD	CD	P	E	52	67*
11	Calcul d'une accélération moyenne d'un mobile qui déplace le long d'une surface horizontale à partir de son graphique vitesse-temps													
	3	7	-	-	ER	LR	D	SE	HD	CD	P	PetE	63	72*
12	Comparaison des vitesses de deux mobiles à partir d'un schéma position-temps													
	30	23	2Cm	1Cfa	T	LR+LP	SF+D	SF+D+S E	HD	I+CD	P	E+Pet E	22*	17
13	Comparaison des accélérations de deux mobiles à partir d'un schéma position-temps													
	42	26	2Cfa + 1Cm	1Cfa+ 1Cm	ER+EC+T	LR+LP	SF+RD +D	SE+SF	HD	I+CD	P	E+Pet E	63	67*
14	Comparaison des vitesses d'un mobile en mouvement vertical ascendant (mobile propulsé à la verticale suivi d'une chute libre) à deux instants donnés													
	13	19	1Cfa	1Cfa+ 1Cm	EC+T	EC+T	SF+RD +D	SE+DE	HD	CD	P	E	59	78*

Tableau 94 : Matrices des relations entre pratiques d'enseignement et acquisitions conceptuelles des élèves en cinématique dans les deux séquences d'enseignement (suite)

15 <sup>A</sup>	Comparaison des vitesses d'un mobile en mouvement vertical ascendant à deux instants donnés													
	17	27	1Cm	2Cm	EC+T	LR+LP	SF+RD +D	SE+DE	HD	CD	P+PetE	E	44*	39
16	Interprétation des signes de l'accélération d'un mobile en mouvement vertical ascendant dans son mouvement ascendant et dans son mouvement descendant													
	24	37	1Cfa + 1Cm	1Cfa+ 1Ctf	EC+T	EC+T+ LR+LP	DE+SF	SE+SF+ D	HD	I+CD	P+PetE	E+PetE	56	83*
17	Interprétation et comparaison des temps de chute de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes													
	4	37	-	1Cm+ 1Ctf	T	LR+LP	DE	SE+SF+ D	HD	I+CD	E	E+PetE	37	56*
18	Interprétation et comparaison des vitesses de mobiles en chute libre dont les masses sont différentes													
	19	56	2Cfa	2Cm+ 1Ctf	T	LR+LP	DE+SF+ RD	SE+SF+ D	HD	I+CD	P+PetE	E+PetE	44	56*
19	Reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile en chute libre													
	7	16	-	1Cm	EC+T	LR+T	DE+SF+ RD	SE+SF	HD	I+CD	P	E+Pet E	81	100*
20	Interprétation de l'évolution du mouvement (rectiligne uniforme et rectiligne uniformément accéléré) d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés													
	9	32	-	3Cfa	T+LR	LP	SE	SE	CD	I+CD	E	E	78	89*
21	Interprétation de la vitesse d'un mobile, à différentes positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés													
	9	32	-	3Cfa	T+LR	LP	SE	SE	CD	I+CD	E	E	4	6*
22 <sup>A</sup>	Reconnaissance du graphique vitesse-temps d'un mobile, entre deux positions, en mouvement sur un système composé de trois plans inclinés													
	21	46	1Cfa	3Cfa+ 1Cm	T	T+LR+L P	SF(?) +D	SF+SE	HD	I+CD	P+PetE	E+PetE	62*	39
23	Reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle <i>Absence de facettes de savoir pour la séquence 1</i>													
	-	19	-	1Cm	-	LP	-	SE+SF+ D	-	CD	-	E	44*	33
24	Reconnaissance de la trajectoire d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle <i>Absence de facettes de savoir pour la séquence 1</i>													
	-	19	-	1Cm	-	LP	-	SE+SF+ D	-	CD	-	E	70*	67
25	Interprétation des composantes de la vitesse d'un mobile en chute libre dont la vitesse initiale horizontale est non nulle <i>Absence de facettes de savoir pour la séquence 1</i>													
	-	32	-	2Cfa+ 1Cm	-	LP	-	SF+D	-	CD	-	E	22*	17
26	Comparaison des temps de chute au sol d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale nulle et d'un mobile en chute libre avec une vitesse initiale horizontale non nulle <i>Absence de facettes de savoir pour les deux séquences</i>													
													74*	44
27	Description des paramètres (force de propulsion et angle de tir) de lancement d'un projectile en vue d'obtenir une plus grande portée <i>Absence de facettes de savoir pour la séquence 1</i>													
	-	7	-	1Cfa	-	LR+LP	-	SE	-	I+CD	-	E	48	94*

## CONCLUSION

Dans cette thèse, nous avons mené une étude de cas multiples exploratoire et descriptive (Gagnon, 2012 ; Stake, 1995, 2005) sur les pratiques d'enseignement ordinaires des modèles et de la modélisation de deux enseignants québécois de physique de 5<sup>e</sup> secondaire en vue de les relier aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Si cette recherche doctorale s'inscrit dans la foulée des travaux réalisés dans le monde francophone qui considèrent les pratiques d'enseignement du point de vue des actions conjointes de l'enseignant et des élèves en accordant une place centrale aux savoirs disciplinaires dans l'organisation de ces pratiques, et dans la continuité des travaux permettant d'établir de fortes relations entre les spécificités des pratiques d'enseignement et les acquisitions conceptuelles chez les élèves, elle présente néanmoins un caractère original en regard de son objet d'étude. En effet, la documentation scientifique fait état d'un nombre important de recherches en didactique des sciences réalisées au cours des trois dernières décennies sur les modèles et la modélisation sous l'angle des conceptions des élèves, des pratiques d'enseignement déclarées des enseignants ou encore sur celui des pratiques d'enseignement observées des enseignants dans le contexte de recherches collaboratives. Mais les pratiques d'enseignement ordinaires, en particulier dans le domaine de la physique cinématique, n'ont pas été explorées. Pourtant, ce domaine est fondamental dans l'apprentissage de la physique mécanique à l'école obligatoire, et pose des défis importants. Notre recherche présente également un caractère original par la proposition d'un cadre d'analyse des pratiques d'enseignement intégrant des fondements théorico-méthodologiques en usage en Europe francophone et en Amérique du Nord. Ce cadre appréhende la pratique d'enseignement comme une construction effectuée par le chercheur sur la base de la pratique observée et de la pratique déclarée et permet une analyse de la pratique dans une perspective multidimensionnelle, en priorisant les dimensions conceptuelle, fonctionnelle, opérationnelle et organisationnelle.

Pour réaliser cette étude de cas, nous avons recouru à une procédure d'échantillonnage par choix raisonné afin de sélectionner, parmi cinq candidats potentiels, deux enseignants de physique de 5<sup>e</sup> secondaire. Ces enseignants enseignent à des élèves âgés de 16 ans dans des classes ordinaires d'écoles secondaires de la région de Québec-Chaudière-Appalaches situées dans des milieux socioéconomiques moyens. Quatre procédures de collecte de données ont été retenues : des

enregistrements vidéos en classe (11 séances de 75 minutes pour l'enseignante 1 et 14 séances de 75 minutes pour l'enseignant 2), des entrevues semi-structurées pré et postenregistrement réalisées avant et après les enregistrements vidéos, des artéfacts de classe divers (scénarios de planification de l'enseignant, rapports de laboratoire des élèves, etc.) et une épreuve visant à mesurer les acquisitions conceptuelles des élèves en physique cinématique au terme des séquences d'enseignement.

Soulignons que la méthodologie de recherche retenue s'inscrit dans une visée de théorisation idéographique des pratiques d'enseignement dont l'essentiel repose sur la description singulière des pratiques dans leur contexte, sans prétendre à la généralisation des résultats avec comme perspective de « travailler à la construction de modèles de la pratique susceptibles de fournir un cadre de lecture des pratiques enseignantes » à plus grande échelle (*Ibid.*, 2002, p. 68). Elle se distingue donc d'une méthodologie de recherche dont la visée est une théorisation nomothétique des pratiques d'enseignement (Bru, 2002) à partir de laquelle il est possible de tirer des lois générales et universelles relatives aux pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation. Les analyses ont été menées dans une double visée : 1) caractériser et comparer la singularité des pratiques des enseignants de manière à dégager leur potentialité sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique (mouvements d'objets matériels en chute libre, sur des plans inclinés, mouvements balistiques, etc.) ; 2) identifier les caractéristiques de ces pratiques favorisant les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. Sous l'angle de la dimension opérationnelle, les pratiques d'enseignement des enseignants ont été analysées en recourant au triplet de genèse : chronogénèse-topogénèse-mésogénèse. Elles ont été réalisées dans la continuité, c'est-à-dire sur la durée totale des séquences, autant dans les moments où s'effectuent des « apprentissages publics » que dans les moments où s'effectuent des « apprentissages privés ». La description et la caractérisation de ces pratiques résultent d'une mise en relation d'analyses conduites sur trois échelles du temps didactique :

1. Une *analyse à l'échelle macroscopique* qui est de l'ordre de la séquence d'enseignement et qui consiste à mettre en évidence les groupes de savoirs du programme de physique de 5<sup>e</sup>

secondaire en jeu dans les séquences d'enseignement et qui conduit à la construction de réseaux des savoirs en relation avec les laboratoires proposés ;

2. Une *analyse à l'échelle mésoscopique* qui est de l'ordre de la dizaine de minutes ou de l'heure et qui permet de se donner une idée, au moyen de synopsis, de la manière avec laquelle les séances sont construites selon cinq indicateurs d'ordre mésoscopique : les thèmes disciplinaires abordés dans les séances, leurs contextes de traitement, les phases de la démarche de modélisation en référence avec celles de la démarche que nous avons conceptualisée dans le cadre conceptuel, les ressources didactiques, ainsi que les modalités d'organisation de la classe ;

3. Une *analyse à l'échelle microscopique* qui est de l'ordre de la seconde ou de la minute et qui permet de se donner une vision détaillée de la manière avec laquelle les savoirs disciplinaires circulent dans les pratiques d'enseignement. Cette analyse qui se situe à l'échelle des actions, discours et gestes des enseignants et des élèves a été faite par un découpage temporel en unité de sens. Elle consiste à décrire et comparer la manière avec laquelle la modélisation de divers phénomènes (chute libre, mouvement vertical ascendant, mouvement sur des plans inclinés ascendants ou descendants avec ou sans propulsion initiale, mouvement balistique, etc.) se manifeste à travers les tâches épistémiques en jeu dans la compréhension du monde matériel et les facettes de savoir formulées par l'enseignant ou les élèves tout au long des séquences d'enseignement. À ce niveau de granularité très fin, nous nous sommes intéressés à comprendre comment le savoir enseigné de la physique "vit" dans la classe, quels sont ses statuts, ses enjeux dont il est l'objet, les formes qu'il peut prendre, et comment il intervient dans la compréhension des élèves. À ce sujet, les pratiques d'enseignement ont fait l'objet d'une analyse sous l'angle des tâches épistémiques en recourant à trois indicateurs d'ordre microscopique : la nature des tâches épistémiques et leur niveau de complexité, les registres de modélisation mobilisés dans les tâches épistémiques et la prise en charge des tâches épistémiques par les acteurs de la classe. Par ailleurs, elles ont fait l'objet d'une analyse sous l'angle des facettes de savoir en recourant à cinq indicateurs d'ordre microscopique : la continuité du savoir, la densité du savoir, l'ancrage des facettes de savoir dans le contexte de traitement des thèmes disciplinaires, la source d'émergence du savoir et l'ancrage des facettes de savoir dans les phases de la démarche de modélisation. L'analyse sous l'angle de facettes de savoir a permis d'aboutir à la construction de matrices des facettes de savoir

associées aux groupes de concepts prescrits du domaine de cinématique du programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire.

De manière à relier certaines caractéristiques des pratiques de modélisation favorables aux acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique, nous avons généré pour chacune des classes, des matrices de facettes de savoir simplifiées à partir des matrices de facettes de savoir construites préalablement, en reprenant les indicateurs d'ordre microscopique retenus pour analyser les facettes de savoir, et ce, pour toutes les questions du questionnaire d'enquête sur les connaissances de base des élèves en cinématique. Ces matrices ont ensuite été mises en relation avec les pourcentages de réussite des élèves aux questions à réponses multiples afin de formuler des hypothèses explicatives sur des configurations de pratique favorisant les acquisitions conceptuelles chez les élèves en considérant l'apprenabilité variable de certains savoirs, d'une part, et en sachant que les causes d'une meilleure performance d'un groupe d'élèves peuvent être multifactorielles, d'autre part. Les données récoltées en lien avec la dimension opérationnelle de la pratique ont été traitées essentiellement à l'aide du logiciel d'analyse multimédia *Transana*.

Les résultats de nos analyses montrent que les pratiques d'enseignement des enseignants sont plutôt singulières pour chacune des dimensions d'analyse retenues dans le cadre d'analyse. Plus particulièrement, celles réalisées sous l'angle de la dimension opérationnelle mettent en évidence des configurations relativement symétriques pour l'ensemble des indicateurs d'ordre macroscopique, mésoscopique et microscopique retenus, lesquels touchent des aspects liés à la chronogénèse, la mésogénèse et la topogénèse du savoir.

Plus précisément, la mise en relation des analyses entre les différentes échelles de granularité (macroscopique, mésoscopique et microscopique) permet de statuer que l'enseignement de la physique chez l'enseignante 1 s'inscrit dans une démarche de modélisation inductiviste-applicationniste (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997). En effet, les analyses réalisées à l'échelle macroscopique montrent que le savoir de cinématique est particulièrement introduit en dehors des laboratoires et qu'une faible proportion de celui-ci est associée aux modèles du mouvement. Les analyses réalisées à l'échelle mésoscopique confirment que seulement le tiers du temps de cette séquence d'enseignement est



réservé à l'acquisition de deux modèles du mouvement (13 % du temps au MRU et 20 % du temps au MRUA), et que cette acquisition se fait en grande partie dans des moments de théorisation et d'exercisation avec un accent fort mis sur la résolution et la correction de problèmes d'application. Ce sont dans ces contextes que les élèves s'approprient en grande partie les variables et les modèles du mouvement. Les intentions éducatives de cette enseignante sont l'appropriation du « vocabulaire scientifique » et la découverte des modèles du mouvement, mais cette découverte se fait essentiellement par le biais des manuels scolaires ou des notes de cours qui donnent lieu à une structuration synthétique du savoir en jeu. Les situations expérimentales en laboratoire sont peu privilégiées pour l'acquisition des modèles du mouvement. À l'échelle microscopique, cela se traduit par une implication des élèves dans des processus de modélisation dont les tâches épistémiques sont : 1) prises essentiellement en charge par l'enseignante ; 2) en grande partie de faible niveau de complexité en priorisant une mobilisation des tâches DÉCRIRE, DÉFINIR et EXPLIQUER ; 3) centrées prioritairement sur la construction du registre théorique, et accordent une faible place à la construction du registre empirique ou à la mise en relation entre ces deux registres pourtant nécessaire à la compréhension des modèles du mouvement. Quant aux tâches épistémiques en jeu, elles donnent lieu à l'introduction de facettes de savoir dont : 1) la distribution se fait plutôt de manière non régulière sur la séquence ; 2) la prise en charge se fait essentiellement par l'enseignante ; 3) les moments de théorisation et d'exercisation y sont privilégiés pour la modélisation et la compréhension des phénomènes physiques. Nous caractérisons une telle démarche inductiviste-applicationniste par les quatre attributs suivants (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997) : a) son paradigme de référence est le scientisme (le savoir est considéré comme univoque et indiscutable) ; b) les finalités de l'expérimentation sont la formulation d'hypothèses explicatives, la manipulation, l'application et la validation d'un modèle ; c) le statut conféré au modèle est celui d'un objet découlant de l'observation ou un fait préexposé à valider au sein d'une expérience non problématisée et structurée (protocole préétabli) ; d) les connaissances initiales des élèves sont en partie négligées, mais néanmoins évolutives par des « observations qui prouvent ». Dans cette logique d'enseignement, le statut conféré au modèle est celui d'un fait scientifique statique à faire apprendre aux élèves et l'enseignement prend la forme d'une séquence d'activités centrées sur l'enseignement des modèles spécifiques en grande partie pris en charge par l'enseignante (Henze *et al.*, 2007).

Cependant, nous relevons une volonté de la part de l'enseignante 1 à ce que ses élèves puissent disposer des outils nécessaires à une compréhension concrète des phénomènes. En effet, à plusieurs moments de la séquence, celle-ci recourt à des simulations informatiques pour leur faire visualiser des phénomènes associés au MRU et au MRUA. Par ces simulations dynamiques réalisées en suivant un contrôle systématique des paramètres, les élèves ont l'occasion de formuler et de tester des hypothèses prédictives sur divers mouvements. Par ailleurs, elle recourt à plusieurs démonstrations expérimentales pour « montrer le fonctionnement des phénomènes ». Lors de ces simulations informatiques et de ces démonstrations expérimentales, plusieurs tâches épistémiques en jeu mettent en relation le MOE avec le MTM, et impliquent la coordination des registres de représentation sémiotique graphiques et algébriques. De ce fait, si nous ne pouvons dire que les élèves sont engagés dans une démarche de modélisation constructiviste, ils sont tout de même engagés dans des activités de modélisation.

Du côté de l'enseignant 2, l'enseignement de la physique prend plutôt la configuration emblématique d'une démarche de modélisation constructiviste (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997) telle que nous l'avons conceptualisée dans le cadre conceptuel. En effet, cet enseignant engage ses élèves dans une démarche leur permettant de prendre en charge l'élaboration des modèles, et de s'appuyer subséquentement sur ceux-ci pour formuler des énoncés scientifiques sur des phénomènes physiques. À l'échelle microscopique, cela se traduit par une implication des élèves dans des processus de modélisation dont les tâches épistémiques : 1) sont prises essentiellement en charge par les élèves ; 2) se déclinent selon des niveaux de complexité variables, tout en accordant une place importante à des tâches épistémiques de niveau assez élevé comme les tâches COMPARER, ÉVALUER et GÉNÉRER ; 3) assurent un équilibre entre la construction du registre empirique et celle du registre théorique. Dans une telle démarche, les tâches épistémiques en jeu donnent lieu à l'introduction de facettes de savoir dont : 1) la distribution se fait de manière relativement continue sur l'ensemble de la séquence, mais avec une introduction plus importante dans les moments de conceptualisation ; 2) la prise en charge se fait essentiellement par les élèves ou conjointement par l'enseignant et les élèves ; 3) les moments de réalisation des laboratoires y sont privilégiés pour la modélisation et la compréhension des phénomènes physiques. Nous caractérisons une telle démarche constructiviste par les quatre

attributs suivants (Fourez et Englebert-Lecompte, 1999 ; Johsua et Dupin, 1989 ; Robardet et Guillaud, 1997) : a) son paradigme de référence est le rationalisme scientifique où le savoir est considéré comme un artéfact, une construction théorique pouvant être débattue ; b) les finalités de l'expérimentation sont la construction d'un modèle et la mise à l'épreuve de ses limites, l'abstraction et la construction des connaissances ; c) le statut conféré au modèle est celui d'un objet intermédiaire entre le concret et la théorie, un fait à construire au sein d'une situation expérimentale problématisée et non structurée (protocole à construire) ; d) les connaissances initiales des élèves sont le point de départ d'un processus de problématisation visant à faire adopter des modèles plus valides de la réalité que ceux dont ils disposent initialement.

Dans cette logique d'enseignement, comme le souligne Martinand (1996, p. 7), l'accent est mis sur « les processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou en partie », et non sur « les modèles plus ou moins “arrangés” que nous pouvons leur présenter au nom de la science ou des programmes ». Le modèle prend un statut différent que dans la logique précédente : il est une réponse à un problème dont la construction nécessite une articulation nécessaire entre la problématisation et la conceptualisation et des allers-retours entre le champ empirique et le champ théorique. À la suite d'Hestenes (1987, 1992), nous adoptons le slogan du psychologue Stenberg (1985) qui dit que « THE MODEL IS THE MESSAGE » pour affirmer l'importance de l'élaboration conceptuelle du modèle au sein de la résolution de problèmes en physique.

En offrant l'opportunité à ses élèves de concevoir, exprimer, comparer, évaluer, tester et réviser des modèles et de réfléchir sur la nature des modèles construits, cet enseignant développe chez eux deux types de connaissances sur les modèles et la modélisation (Schwartz et Lederman, 2005 ; Schwarz et White, 2005 ; Schwarz *et al.*, 2009) : des connaissances sur les pratiques de la modélisation scientifique (« knowledge of scientific modeling practices »), d'une part, et des connaissances sur la métamodélisation (« metamodeling knowledge »), d'autre part. Ces connaissances, qui se développent dans la complémentarité, font partie des apprentissages fondamentaux des sciences selon Fourez et Englebert-Lecompte (1999) qui proposent deux axes pour enseigner la modélisation dans une perspective bachelardienne et poppérienne. Le premier est l'« abstraction modélisante » qui consiste à engager les élèves dans la construction et l'utilisation

de modèles (ceux qu'ils ont élaborés ou que d'autres ont élaborés). Il s'agit ici de convaincre les élèves qu'il s'avère plus simple de travailler sur une représentation d'un phénomène que sur le phénomène lui-même. À ce sujet, ces auteurs donnent l'exemple d'une carte topographique qui consiste en une représentation d'une réalité plus complexe qu'est celle d'un terrain<sup>121</sup>. Le second axe se réfère à la capacité des élèves à tester des modèles. Si la pratique consistant à tester des modèles, des lois et des théories scientifiques semble assez caractéristique du succès des sciences, elle mérite de la faire connaître et de l'enseigner aux élèves (Fourez et Englebert-Lecomte, 1999). En recourant à l'analogie de la cartographie, ces auteurs soulignent que pour un terrain, il y a une multitude de cartes possibles comme c'est le cas d'un phénomène qui peut être représenté par une grande diversité de modèles (Fourez et Englebert-Lecomte, 1999, p. 9) : « Pour construire une carte — comme pour construire des modèles scientifiques —, des choix sont nécessaires et plusieurs d'entre eux sont valables. Mais toutes les cartes construites ne seront pas équivalentes. De la même façon, les modèles scientifiques ne sont pas équivalents. Si on les pousse à fond, ils révéleront tous des limites, mais certaines sont plus gênantes que d'autres. » Et ils ajoutent que

d'une manière générale, l'utilité (la pertinence) d'un modèle dépend du projet que l'on a et du contexte dans lequel on se trouve. Sa fiabilité peut être éprouvée (mais non prouvée) via divers tests (qui fonctionnent comme indicateurs de cette fiabilité). Ainsi, pour tester expérimentalement une carte routière, il suffit d'aller voir sur le terrain si on trouve effectivement un chemin là où la carte l'indique. Après plusieurs tests positifs, on estimera que le modèle est effectivement fiable et bien éprouvé. Dans le langage courant, on tendra à dire qu'on a “prouvé” que la carte est “correcte”, c'est-à-dire cohérente par rapport à ses conventions (*Ibid.*, p. 9).

À ces deux axes, Fourez et Englebert-Lecomte (1999) soulignent l'importance de doter les élèves d'une « connaissance seconde de la modélisation » qui relève de la « métacognition critique », celle qui permet de porter une réflexion sur les modèles et les processus de modélisation, et qui se réfère à l'idée de « connaissances sur la métamodélisation » proposée par Schwarz et ses collègues. Tous ces arguments sont en cohérence avec ceux d'Hestenes (1996, p. 7) qui affirme

---

<sup>121</sup> La carte, même si elle est une représentation simplifiée d'un terrain (en ne représentant que les aspects que l'on souhaite mettre en évidence), est plus simple à interpréter que de parcourir le terrain lui-même.

que « la compréhension physique est un ensemble complexe de compétences de modélisation, c'est-à-dire de compétences cognitives pour concevoir et utiliser des modèles ». <sup>122</sup>

Nous ne nions pas qu'une démarche de modélisation inductiviste-applicationniste puisse contribuer à des apprentissages significatifs en classe de physique. Mais cette démarche linéaire s'appuie sur le modèle idéalisé de la démarche scientifique OHERIC (**O**bservation, **H**ypothèse, **E**xpérience, **R**ésultats, **I**nterprétation, **C**onclusion) conceptualisée à partir des travaux de Claude Bernard et donne lieu à la formulation de plusieurs critiques par les didacticiens de sciences, notamment en raison qu'elle met l'accent sur l'observation au détriment de l'apport des présupposés théoriques et des grilles de lecture dans les processus d'observation. On peut regarder très attentivement le mouvement de projectiles lancés horizontalement ou obliquement pendant des heures, sans pour autant construire le modèle du mouvement balistique. Autrement dit, la simple observation ne conduit pas à l'élaboration de modèles théoriques. Dans une telle configuration, « on semble y oublier qu'on ne part pas de zéro pour observer, mais bien avec une histoire et donc des grilles de lecture "spontanées" ou apprises (comme les façons d'observer à la manière du biologiste ou du physicien). » (Fourez et Englebert-Lecomte (1999, p. 6). Rappelons que sur le plan épistémologique, les faits en sciences sont le fruit d'« une construction de la réalité et donc d'une conceptualisation du réel selon des cadres de références spécifiques » (Lebrun, Hasni et Lebeaume, 2018, p. 1) et que « la vérité ou la fausseté des faits et des savoirs qui en découlent n'a de sens que par sa référence à une théorie établie » (Hasni et Bousadra, 2018, p. 56). À l'école, nous pensons qu'il en devrait être de même.

Nos résultats montrent que les démarches de modélisation inductiviste-applicationniste et constructiviste n'offrent pas le même potentiel sur la prise en charge des processus de modélisation par les élèves et leur compréhension de divers phénomènes de la physique. Plus précisément, le recours à une démarche de modélisation constructiviste favoriserait les acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique. En effet, une meilleure compréhension des savoirs conceptuels de cinématique chez les élèves s'expliquerait par un enseignement de la physique

---

<sup>122</sup> Traduction libre : « physical understanding is a complex set of modeling skills, that is, cognitive skills for making and using models. » (Hestenes, 1996, p. 7)

dont : 1) la continuité du savoir est élevée ; 2) les thèmes disciplinaires sont traités en laboratoire plutôt que dans des moments de théorisation ou d'exercisation ; 3) le savoir émerge de situations expérimentales plutôt que de manière décontextualisée, de ressources didactiques, de situations fictives ou de démonstrations expérimentales ; 4) le savoir est construit par les élèves ou conjointement par l'enseignant et les élèves plutôt que transmis uniquement par l'enseignant. À contrario, le recours à une démarche de modélisation inductiviste-applicationniste engendrerait des blocages conceptuels fréquents et freinerait l'acquisition des concepts et modèles du mouvement. Nos résultats rejoignent ceux d'Halloun (2007) qui a montré au moyen de son questionnaire pour mesurer les connaissances conceptuelles de base en physique (« The Inventories of Basic Conceptions »)<sup>123</sup> (et sur lequel nous nous sommes fortement appuyés) que les élèves engagés dans des démarches de modélisation constructivistes ont une compréhension conceptuelle plus élevée des phénomènes de la physique mécanique que ceux engagés dans un enseignement conventionnel de la modélisation dont l'acquisition des modèles se fait essentiellement par des exposés magistraux ou des démonstrations expérimentales.

Si la dimension opérationnelle est au cœur de notre cadre d'analyse, les autres dimensions d'analyse (conceptuelle, fonctionnelle et organisationnelle) apportent un éclairage complémentaire sur les pratiques d'enseignement des modèles et de la modélisation de ces deux enseignants. Elles mettent en évidence la nécessité de développer chez les futurs enseignants et les enseignants de physique des compétences épistémologiques et méthodologiques sur les modèles et la modélisation. En effet, alors que l'enseignante 1 témoigne d'une compréhension partielle de ces objets d'étude en confondant le modèle avec une représentation sémiotique et la démarche de modélisation avec une démarche de résolution de problèmes d'application, et en donnant une interprétation inductiviste-applicationniste de la démarche de modélisation, l'enseignant 2 conçoit le modèle comme un outil de pensée intermédiaire entre le monde concret et le monde conceptuel (physique et mathématique) et donne une interprétation constructiviste de cette démarche. Chez l'enseignante 1, les finalités éducatives associées à l'apprentissage des modèles et la modélisation sont centrées sur l'acquisition d'un « vocabulaire scientifique », de savoir procéduraux et

---

<sup>123</sup> Cette épreuve a été développée par Halloun qui s'est appuyé sur deux tests standardisés : le « Mechanics Diagnostic Test » (Halloun, 1984 ; Halloun et Hestenes, 1985) et le « Force Concept Inventory » (Hestenes, Wells et Swackhamer, 1992).

d'habiletés de résolution de problèmes d'application alors que chez l'enseignant 2 elles couvrent une plus large gamme de savoirs parmi lesquels des savoirs conceptuels, méthodologiques et épistémologiques en physique et en mathématique, des compétences transversales d'ordre de la communication (*communiquer de façon appropriée*) et d'ordre personnel et social (*coopérer*). Enfin, nous avons relevé que la nature des défis et difficultés du côté des élèves et des enseignants quant à l'enseignement des modèles et de la modélisation se distinguent nettement chez les deux enseignants. L'enseignante 1 pointe du doigt des défis et difficultés externes associés aux caractéristiques psychopédagogiques des élèves (leur faible compréhension des savoirs conceptuels qui est d'ailleurs fortement confirmée par l'analyse de la pratique observée) ou à des aspects logistiques (la faible disponibilité de ressources didactiques pour modéliser des phénomènes malgré l'existence de ressources à ce sujet) alors que chez l'enseignant 2 les défis et difficultés sont plutôt du côté de la mise en œuvre de la démarche de modélisation (utilisation du matériel de laboratoire, rigueur dans les manipulations expérimentales, etc.).

La contribution de cette thèse dans la communauté scientifique est essentiellement d'ordre théorico-méthodologique. Elle concerne la recension d'écrits sur les modèles et la modélisation en enseignement de la physique, et la proposition d'un cadre conceptuel et méthodologique original intégrant des fondements théoriques et opérationnels sur les pratiques d'enseignement en usage en Europe francophone et en Amérique du Nord. Cette thèse marque par ailleurs une avancée importante sur la mise à jour de nouveaux facteurs pouvant influencer les apprentissages des élèves en physique dont les analyses ont été conduites à l'échelle microscopique sous l'angle des facettes de savoir. Il s'agit plus particulièrement du contexte de traitement du savoir, de la source d'émergence du savoir et de l'ancrage du savoir dans les phases d'une démarche de modélisation.

Les principales limites de cette thèse se situent sur le plan méthodologique. On peut en citer au moins quatre. La première limite concerne la taille limitée de l'échantillon. La seconde limite concerne le choix des dimensions d'analyse pour analyser la pratique d'enseignement. Nous n'avons retenu que quatre dimensions d'analyse parmi un large éventail de possibilités (si l'on se réfère aux multiples dimensions d'analyse de l'intervention éducative évoquées par Lenoir et Vanhulle, 2006), ce qui pose d'emblée le caractère réducteur de toute modélisation de la pratique. La prise en compte de la dimension professionnelle de la pratique (liée à la formation des

enseignants) aurait permis de voir l'influence de la formation initiale et continue de ces enseignants sur leur compétence à enseigner les modèles et la modélisation. La troisième limite concerne les outils de collecte de données. Le questionnaire d'enquête sur les connaissances de base en physique cinématique uniquement au terme des séquences d'enseignement est-il suffisant pour rendre compte des acquisitions conceptuelles des élèves dans le domaine de la cinématique ? Nous pensons que l'utilisation d'un questionnaire préenseignement<sup>124</sup> aurait pu augmenter la validité des résultats obtenus. Par ailleurs, le recours à des entretiens d'autoconfrontation plutôt que des entretiens postenseignement à chaud aurait davantage permis de saisir les choix opérés par les enseignants sur l'enseignement des modèles et de la modélisation. Enfin, la quatrième limite concerne l'absence d'une évaluation multifactorielle de la pratique en sachant que plusieurs facteurs (parmi ceux étudiés ou non) peuvent interférer de manière simultanée sur les apprentissages des élèves.

Sur le plan de la recherche, cette étude ouvre plusieurs perspectives qui n'ont pas encore été explorées jusqu'à ce jour. Les indicateurs d'ordre mésoscopique et microscopique retenus pourraient faire l'objet d'une exploration à plus grande échelle au sein de recherches s'appuyant sur des devis quantitatifs (de type corrélationnel ou quasi expérimental) visant à montrer les relations ou les effets des pratiques d'enseignement sur les apprentissages conceptuels des élèves dans divers domaines de la physique (ex. : cinématique, dynamique, optique, etc.) ou dans d'autres disciplines scientifiques. Pour les formateurs-chercheurs qui interviennent dans la formation initiale et continue à l'enseignement, les résultats de cette thèse peuvent contribuer à une réflexion sur la caractérisation des milieux didactiques offrant un fort potentiel d'apprentissage chez la majorité des élèves d'une classe.

Enfin, nous concluons en reprenant les propos d'Hestenes (1992, p. 732) qui dit que « le grand jeu de la science est la modélisation du monde réel, et chaque théorie scientifique établit un système de règles pour jouer le jeu. L'objectif de ce jeu est de construire des modèles valides des objets et des processus de la réalité. Ces modèles constituent le noyau de contenu du savoir scientifique. Comprendre la science, c'est savoir comment les modèles scientifiques sont construits

---

<sup>124</sup> Ce choix a été fait considérant que les savoirs visés dans le programme de physique de 5<sup>e</sup> secondaire pour le domaine de la cinématique sont en grande partie des savoirs nouveaux.



et validés »<sup>125</sup>. Nous sommes d'avis avec cet auteur qui dit à propos de l'éducation scientifique que « le principal objectif de l'enseignement des sciences doit donc être d'enseigner le jeu de modélisation » (*Ibid.*, p. 7)<sup>126</sup>. Or, pour bien jouer au jeu de la modélisation en classe de physique, le système de règles doit être connu par tous les acteurs de la classe et le milieu didactique dans lequel se déroule ce jeu doit être propice au développement de compétences de modélisation. Si nous interprétons le jeu de la modélisation avec les concepts de la théorie de l'action conjointe en didactique (Sensevy, 2007, 2008, 2011), les *transactions didactiques* qui se jouent entre l'enseignant et les élèves prennent sens au sein d'une *grammaire spécifique*<sup>127</sup> d'un *jeu didactique* organiquement *coopératif* et *dissymétrique* entre l'enseignant et les élèves (Santini et Sensevy, 2011, p. 1) : « Coopératif car, dans un tel jeu, le joueur E (l'instance-élève) gagne s'il produit raisonnablement de lui-même les stratégies gagnantes relatives aux savoirs en jeu et le joueur P (l'instance professeur) gagne à son tour en seconde main lorsque le joueur E gagne en première main ». Mais le jeu ne peut être gagné que si le joueur P fait preuve d'une certaine *réticence didactique* face au joueur E, ce qui l'engage à ne pas dévoiler les stratégies gagnantes à mettre en œuvre. Par ailleurs, ce jeu est bien *symétrique* « car P et E sont, par essence, inégaux face aux savoirs en jeu mais également car c'est P qui décrète le gain de E. Le joueur P occupe ainsi une position dans le jeu didactique où il est à la fois juge et partie. » (*Ibid.*, 2011, p. 1).

Adopter un enseignement des modèles et de la modélisation s'inscrivant dans une perspective constructiviste n'est pas trivial. Cela nécessite que l'enseignant dispose de solides compétences épistémiques, épistémologiques et didactiques sur ces objets d'étude. De notre point de vue, ces compétences devraient être considérées au premier rang dans les dispositifs de formation initiale et continue des enseignants.

---

<sup>125</sup> Traduction libre : « The great game of science is modeling the real world, and each scientific theory lays down a system of rules for playing the game. The object of the game is to construct valid models of real objects and processes. Such models comprise the content core of scientific knowledge. To understand science is to know how scientific models are constructed and validated. » (Hestenes, 1992, p. 732).

<sup>126</sup> Traduction libre : « the primary objective of physics teaching should therefore be to develop student modeling skills » (Hestenes, 1996, p. 7)

<sup>127</sup> On pourrait se référer ici au langage de la physique qui donne aux élèves des manières de penser et d'agir spécifiques sur le monde.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Acher, A., Arcà, M., et Sanmartí, N. (2007). Modeling as a teaching learning process for understanding materials: A case study in primary education. *Science education*, 91(3), 398–418.
- Adadan, E., Irving, K. E., et Trundle, K. C. (2009). Impacts of multi-representational instruction on high school students' conceptual understandings of the particulate nature of matter. *International journal of science education*, 31(13), 1743–1775.
- Aguirre, J. M., et Rankin, G. (1989). College students' conceptions about vector kinematics. *Physics education*, 24(5), 290–94.
- Ainsworth, S. (2008). The educational value of multiple-representations when learning complex scientific concepts. Dans J. K. Gilbert, M. Reiner, et M. Nakhleh (Éd.) *Visualization: theory and practice in science education* (p. 191–208). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Aktan, M. B. (2005). *Investigation of prospective teachers knowledge and understanding of models and modeling and their attitudes towards the use of models in science education*. (Thèse de doctorat, Purdue University, West Lafayette, Indiana).
- Alonso, M., et Finn, E. (1986). *Physique générale* (2<sup>e</sup> éd., Alonso, Marcelo. - Physique générale 1). Paris : InterEditions.
- Altet, M. (2001). *Demande de création d'un réseau présentée au ministère de la Recherche, MSU-DS7. Réseau OPEN, réseau d'observation des pratiques enseignantes*. Nantes : Université de Nantes.
- Altet, M. (2002a). Une démarche de recherche sur la pratique enseignante : l'analyse plurielle. *Revue française de pédagogie*, 138, 85–93.
- Amade-Escot, C., et Venturini, P. (2009). Le milieu didactique : d'une étude empirique en contexte difficile à une réflexion sur le concept. *Éducation et Didactique*, 3(1), 7–43.
- Anciaux, F., Forissier, T., et Prudent, L. F. (2013). *Contextualisations didactiques : approches théoriques*. Paris : L'Harmattan.
- Anderson, L. W., Krathwohl, D. R., Airasian, P., Cruikshank, K., Mayer, R., Pintrich, P., ... Wittrock, M. (2001). A taxonomy for learning, teaching and assessing: A revision of Bloom's taxonomy. Dans A. F. Artzt et E. Armour-Thomas (Éd.), *Development of a cognitive-metacognitive framework for protocol analysis of mathematical problem solving in small groups*. *Cognition and instruction* (Vol. 9, p. 137–175). New York: Longman Publishing.
- Angell, C., Kind, P. M., Henriksen, E. K., et Guttersrud, Ø. (2008). An empirical-mathematical modelling approach to upper secondary physics. *Physics Education*, 43(3), 256–264.
- Astolfi, J. P. (1993). *Placer les élèves en situations-problèmes*. Paris : INRP.
- Astolfi, J.-P. (2008). *La saveur des savoirs : disciplines et plaisir d'apprendre*. Issy-les-Moulineaux : ESF.
- Astolfi, J. P., Peterfalvi, B., et Vrin, A. (2001). *Comment les enfants apprennent les sciences*. Paris : Retz.
- Astolfi, J.-P., Darot, É., Ginsburger-Vogel, Y., et Toussaint, J. (1997). Mots-clés de la didactique des sciences : repères, définitions, bibliographies. Bruxelles : De Boeck.
- Astolfi, J.-P., et Develay, M. (2002). *La didactique des sciences*. Paris : Presses universitaires de France.
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- Bachelard, G. (1998/1949). *Le rationalisme appliqué*. Paris : PUF.
- Bachelard, S. (1979). *Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles*. Paris: Maloine Editions.
- Badreddine, Z. (2009). *Étude des décisions chronogénétiques des enseignants dans l'enseignement de la physique au collège ; une étude de cas au Liban* (Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II et Université Libanaise, France).
- Bailer-Jones, D. M. (1999). Tracing the Development of Models in the Philosophy of Science. Dans L. Magnani, N. J. Nersessian, et P. Thagard (Éd.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 23–40). New York : Springer.
- Bailer-Jones, D. M. (2002). Scientists' thoughts on scientific models. *Perspectives on Science*, 10(3), 275–301.

- Bange, P. (1992). *Analyse conversationnelle et théorie de l'action*. Paris : Hatier et Didier.
- Bardin, L. (2007). *L'analyse de contenu*. Paris : Presses universitaires de France.
- Bécu-Robinault, K. (1997). *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques* (Thèse de doctorat, Université Lyon I, France).
- Beillerot, J. (1996). L'analyse des pratiques professionnelles : pourquoi cette expression. *Cahiers pédagogiques*, 346, 12–13.
- Beillerot, J. (1998). *L'éducation en débats : la fin des certitudes*. Paris : Editions L'Harmattan.
- Bell, P. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational researcher*, 32, 5–8.
- Bensaada, A., et Ouellette, B. (2010). *Quantum Physique - 2<sup>e</sup> cycle (3<sup>e</sup> année)*. Montréal, Québec : Chenelière éducation inc.
- Beorchia, F. (2005). Débat scientifique et engagement des élèves dans la problématisation : Cas d'un débat sur la commande nerveuse du mouvement en CM2 (10-11 ans). Dans C. Orange (Éd.), *Problème et problématisation* (Vol. 40, p. 121-152). Lyon : INRP.
- Besson, U. (2010). Calculating and understanding: formal models and causal explanations in science, common reasoning and physics teaching. *Science et Education*, 19(3), 225–257.
- Black, M. (1954). Metaphor. *Proc Aristotelian Soc*, 55, 273–294.
- Black, M. (1962). *Models and metaphors: studies in language and philosophy*. Ithaca, NY/London: Cornell University Press.
- Bloom, B. S., Hastings, J. T., et Madaus, G. F. (1971). *Handbook on formative and summative evaluation of student learning*. New York: McGraw-Hill.
- Bloom, B. S., et Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of educational objectives: the classification of educational goals, by a committee of college and university examiners*. New York, NY: Longmans, Green.
- Boilevin, J.-M. (2005). Enseigner la physique par situation problème ou par problème ouvert. Dans C. Orange (Éd.), *Problème et problématisation* (Vol. 40, p. 13-38). Lyon: INRP.
- Boilevin, J.-M., Brandt-Pomares, P., Givry, D., et Delserieys, A. (2012). L'enseignement des sciences et de la technologie fondé sur l'investigation : étude d'un dispositif collaboratif entre enseignants de collège et chercheurs en didactique. Dans B. Calmettes (Éd.), *Démarches d'investigation : références, représentations, pratiques et formation* (p. 214–234). Paris : L'Harmattan.
- Baron, J. (2004). Identifying and implementing education practices supported by rigorous evidence: a user friendly guide. *Journal for vocational special needs education*, 26, 40–54.
- Bécu-Robinault, K. (2015). *Un cadre épistemo-sémiotique pour concevoir des séances et analyser des pratiques d'étude et d'enseignement de la physique* (Habilitation à diriger des recherches, Université Toulouse Jean- Jaurès, France).
- Bouleau, N. (1999). *Philosophies des mathématiques et de la modélisation : Du chercheur à l'ingénieur*. Paris : L'Harmattan.
- Boulter, C. J., et Buckley, B. C. (2000). Constructing a typology of models for science education. Dans J. K. Gilbert et C. J. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 41–57). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Boulter, C. J., et Gilbert, J. K. (2000). Challenges and opportunities of developing models in science education. Dans J. Gilbert et C. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 343–362). Dordrecht: Kluwer.
- Bourdieu, P. (1994). *Raisons pratiques. Sur la théorie de l'action*. Paris : Le seuil.
- Bourdieu, P. (1980). *Le sens pratique*. Paris : Éditions de Minuit.
- Bousadra, F. (2014). *L'enseignement par projets en sciences et technologies : études des pratiques d'enseignement chez des enseignants du secondaire au Québec* (Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Canada).
- Bowden, J., Dall'Alba, G., Martin, E., Laurillard, D., Marton, F., Masters, G., ... Walsh, E. (1992). Displacement, velocity, and frames of reference: phenomenographic studies of students' understanding and some implications for teaching and assessment. *American Journal of Physics*, 60(3), 262–269.

- Bressoux, P. (2001). Réflexions sur l'effet-maitre et l'étude des pratiques enseignantes. *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation : « Les pratiques enseignantes : contributions plurielles*, 5, 35-52.
- Bressoux, P., Bru, M., Altet, M., et Leconte-Lambert, C. (1999). Diversité des pratiques d'enseignement à l'école élémentaire. *Revue française de pédagogie*, 126, 97-110.
- Brousseau, G., Balacheff, N., Cooper, M., et Sutherland, R. (1998). *Théorie des situations didactiques : Didactique des mathématiques 1970-1990*. Paris : La pensée sauvage.
- Bru, M. (2002). Pratiques enseignantes : des recherches à conforter et à développer. *Revue française de pédagogie*, 138, 63-73.
- Bru, M., Altet, M., et Blanchard-Laville, C. (2004). À la recherche des processus caractéristiques des pratiques enseignantes dans leurs rapports aux apprentissages. *Revue française de pédagogie*, 148, 75-87.
- Bru, M., et Talbot, L. (2001). Les pratiques enseignantes : une visée, des regards. *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, 5, 9-33.
- Buckley, B. C., et Boulter, C. J. (2000). Investigating the role of representations and expressed models in building mental models. Dans J. K. Gilbert et C. J. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 119-135). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Bunge, M. (1967). *Scientific Research, I-II*. New York: Springer-Verlag.
- Bunge, M. (1973a). *Method and matter*. Dordrecht, Holland: D. Deidel publishing company.
- Bunge, M. (1973b). *Method, model, and matter*. Dordrecht: Reidel.
- Bunge, M. (1973c). *Philosophy of physics*. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publishing Company.
- Bunge, M. (1974). *Treatise on basic philosophy (Vols. 1-2, Semantics; 3-4, Ontology; 5-7, Epistemology and methodology (Vol. 7 with 2 parts); 8, Ethics: The good and the right)*. Dordrecht: Reidel.
- Bunge, M. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris : Édition du Seuil.
- Bunge, M. (1983). *Épistémologie*. Paris : Maloine.
- Bunge, M. (1983). *Treatise on Basic Philosophy: Volume 6: Epistemology et Methodology II: Understanding the World (Vol. 6)*. Dordrecht: D. Reidel.
- Buty, C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique* (Thèse de doctorat, Université Lyon 2, Lyon, France).
- Buty, C., Badreddine, Z., et Régnier, J.-C. (2012). Didactique des sciences et interactions dans la classe : quelques lignes directrices pour une analyse dynamique. *ENSAIO Pesquisa em educação em ciências*, 14(1), 147.
- Buty, C., Tiberghien, A., et Le Maréchal, J.-F. (2004). Learning hypotheses and an associated tool to design and to analyse teaching-learning sequences. *International journal of science education*, 26(5), 579-604.
- Cabot, L. H. (2008). *Transforming teacher knowledge: Modeling instruction in physics* (Unpublished doctoral dissertation, University of Washington., Washington).
- Calmettes, B. (2009). Démarche d'investigation en physique. *Spirale-Revue de recherches en éducation*, 43, 139-148.
- Calmettes, B. (2012). *Didactique des sciences et démarches d'investigation : références, représentations, pratiques et formation*. Paris : Editions L'Harmattan.
- Calmettes, B., et Matheron, Y. (2015a) (Ed.). Les démarches d'investigation et leurs déclinaisons en mathématiques, physique, sciences de la vie et de la Terre, *Recherches en Éducation*, 21.
- Calmettes, B., et Matheron, Y. (2015b). Les démarches d'investigation : utopie, mythe ou réalité ? *Recherches en Éducation*, 21, 3-11.
- Campbell, D. T., et Erdogan, I. (2005). A look at student action in the science classroom. *Science education international*, 17(2), 101-113.
- Canguilhem, G. (1968). Modèles et analogies dans la découverte en géologie. Dans G. Canguilhem (Éd.), *Études d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris: Vrin.
- Capps, D. K., et Crawford, B. A. (2013). Inquiry-based instruction and teaching about nature of science: Are they happening? *Journal of science teacher education*, 24(3), 497-526.

- Caramazza, A., McCloskey, M., et Green, B. (1981). Naive beliefs in « sophisticated » subjects: misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9(2), 117–123.
- Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Cariou, J.-Y. (2015). Quels critères pour quelles démarches d’investigation ? Articuler esprit créatif et esprit de contrôle. *Recherches en éducation*, 21, 12-33.
- Champagne, M., Séguin, M., et Cossette, M. (2017a). *Option sciences. Physique : La mécanique*. Cahier des savoirs et d’activités pour la 5<sup>e</sup> secondaire (3<sup>e</sup> édition). Saint-Laurent : Éditions du nouveau pédagogique inc.
- Champagne, M., Séguin, M., et Cossette, M. (2017b). *Option sciences. Physique : La mécanique*. Corrigé des cahiers de savoirs et d’activités pour la 5<sup>e</sup> secondaire (3<sup>e</sup> édition). Saint-Laurent : Éditions du nouveau pédagogique inc.
- Chappet Paries, M. (2004). Comparaison de pratiques d’enseignants de mathématiques relations entre discours des professeurs et activités potentielles des élèves. *Recherches en didactique des mathématiques*, 24(2-3), 251–284.
- Chevallard, Y. (1991). *La transposition didactique*. Grenoble : La Pensée Sauvage (1<sup>re</sup> édition 1985).
- Chevallard, Y. (1999). L’analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, 19(2), 221–265.
- Chin, C. (2007). Teacher questioning in science classrooms: Approaches that stimulate productive thinking. *Journal of research in science teaching*, 44(6), 815–843.
- Chittleborough, G. D., Treagust, D. F., Mamiala, T. L., et Mocerino, M. (2005). Students’ perceptions of the role of models in the process of science and in the process of learning. *Research in science et technological education*, 23(2), 195–212.
- Chomat, A., Larcher, C., et Méheut, M. (1992). Modèle particulière et démarches de modélisation. Dans J.-L. Martinand (Éd.), *Enseignement et l’apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 119-169). Lyon : INRP.
- Clanet, J. (2005). Contribution à l’étude des pratiques d’enseignement. Caractérisation des interactions maître-élève (s) et performances scolaires. *Dossier des Sciences de l’Éducation*, 14(1), 11-28.
- Clement, J. (1989). Learning via model construction and criticism: Protocol evidence on sources of creativity in science. Dans J. A. Glover, R. R. Ronning, et C. R. Reynolds (Éd.), *Handbook of creativity: Assessment, theory and research* (p. 341–381). New York: Plenum Press.
- Clement, J. J., et Rea-Ramirez, M. A. (2008). *Model-based learning and instruction in science*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Cobb, P., Gresalfi, M., et Hodge, L. L. (2006). An Interpretive Scheme for Analyzing the Identities that Students Develop in Mathematics Classrooms. Paper presented at *the Annual meeting of the American Educational Research Association, San Francisco*.
- Coince, D., Miguet, A., S, P. M., Rondepierre, T., Tiberghien, A., et Vince, J. (2008). Une introduction à la nature et au fonctionnement de la physique pour des élèves de seconde. *Bulletin de l’union des physiciens*, 102(900), 3-20.
- Coll, R. K., France, B., et Taylor, I. (2005). The role of models/and analogies in science education: implications from research. *International journal of science education*, 27(2), 183–198.
- Collins, A., et Ferguson, W. (1993). Epistemic forms and epistemic games: Structures and strategies to guide inquiry. *Educational Psychologist*, 28(1), 25–42.
- Collins, A., et Gentner, D. (1987). How people construct mental models. Dans D. Holland et N. Quinn (Éd.), *Cultural models in language and thought* (p. 243-265). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Conseil Supérieur de l’Éducation. (2004). *Un nouveau souffle pour la profession enseignante. Avis au ministre de l’éducation*. Québec : Conseil supérieur de l’éducation.
- Conseil Supérieur de l’Éducation. (2005). *L’accès à la recherche en enseignement et son utilisation dans la pratique : résultats d’une enquête auprès des enseignants et des enseignantes du préscolaire, du primaire et du secondaire*. Québec : Conseil supérieur de l’éducation.

- Conseil Supérieur de l'Éducation. (2006). *Le dialogue entre la recherche et la pratique en éducation : une clé pour la réussite. Rapport annuel sur l'état et les besoins de l'éducation*. Québec : Conseil supérieur de l'éducation.
- Coppens, N. (2003). *L'évaluation d'un outil méthodologique de recueil de conceptions et d'analyse de raisonnements en physique* (Mémoire de DEA. France : Université Paris 7).
- Coppens, N., et Munier, V. (2005). Évaluation d'un outil méthodologique, le « double QCM », pour le recueil de conceptions et l'analyse de raisonnements en physique. *Didaskalia*, 27, 41-77.
- Coquidé, M., et Le Maréchal, J. F. (2006). Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : usages et impacts. *Aster*, 43, 7-16.
- Crawford, B. A., et Cullin, M. J. (2004). Supporting prospective teachers' conceptions of modelling in science. *International Journal of Science Education*, 26(11), 1379-1401.
- Damska, I. (1959). Le concept de modèle et son rôle dans les sciences. *Revue de synthèse*, 30, 39-51.
- Danusso, L., Testa, I., et Vicentini, M. (2010). Improving Prospective Teachers' Knowledge about Scientific Models and Modelling: Design and Evaluation of a Teacher Education Intervention. *International Journal of Science Education*, 32(7), 871-905.
- de Dios Jiménez-Valladares, J., et Perales-Palacios, F. J. (2001). Graphic representation of force in secondary education: analysis and alternative educational proposals. *Physics education*, 36(3), 227.
- D'Espagnat, B. (1983). *In search of reality*. New York: Springer.
- Dewey, J. (1993/1938). *Logique. La théorie de l'enquête*. Paris : PUF (1<sup>re</sup> éd. 1938).
- Dori, Y. J., et Belcher, J. (2005). Learning electromagnetism with visualizations and active learning. Dans J. K. Gilbert (Éd.), *Visualization in Science Education* (p. 187-216). Netherlands: Springer.
- Driver, R., Leach, J., Millar, R., et Scott, P. (1996). *Young people's images of science*. Buckingham, UK: Open University Press.
- Driver, R., Newton, P., Osborne, J., et others. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science education*, 84(3), 287-312.
- Drouin, A. M. (1988). Le modèle en question. *Aster*, 7, 1-20.
- Duit, R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science education*, 75(6), 649-672.
- Duit, R., et Glynn, S. (1996). Mental modelling. Dans G. Welford, J. Osborne, et P. Scott (Éd.), *Research in science education in Europe: current issues and themes* (p. 166-176). London: The Falmer Press.
- Dumas-Carré, A., Goffard, M., et Gil, D. (1992). Difficultés des élèves liées aux différentes activités cognitives de résolution de problèmes. *Aster*, (14), 53-75.
- Duran, E., Ballone-Duran, L., Haney, J., et Belyukova, S. (2009). The impact of a professional development program integrating informal science education on early childhood teachers' self-efficacy and beliefs about inquiry-based science teaching. *Journal of Elementary Science Education*, 21(4), 53-70.
- Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, 5(1), 37-65.
- Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine : registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Berne : Peter Lang.
- Einstein, A., et Infeld, L. (1948). *L'évolution des idées en physique*. Paris : Flammarion.
- Erdogan, I., et Campbell, T. (2008). Teacher Questioning and Interaction Patterns in Classrooms Facilitated with Differing Levels of Constructivist Teaching Practices. *International journal of science education*, 30(14), 1891-1914.
- Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : Presses universitaires de France.
- Fabre, M. (2005a). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les sciences de l'éducation-pour l'ère nouvelle*, 38(3), 53-67.
- Fabre, M. (2005b). La problématisation : approches épistémologiques. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, 38(3), 7-10.
- Fabre, M. (2006). Qu'est-ce que problématiser ? L'apport de John Dewey. Dans M. Fabre et E. Vellas (Éd.), *Situations de formation et problématisation* (p. 17-30). Bruxelles : De Boeck.
- Fabre, M. (2009). *Philosophie et pédagogie du problème*. Paris : Vrin.

- Fabre, M., et Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, 24 (*Obstacles : travail didactique*), 37-57.
- Feynman, R. (1980). *La nature de la physique*. Paris : Editions du Seuil.
- Fischer, H., Duit, R., et Labudde, P. (2005). Video-studies on the Practice of Lower Secondary Physics Instruction in Germany and Switzerland—Design, Theoretical Frameworks, and a Summary of Major Findings. Dans R. Pintò et D. Couso (Éd.), *Proceedings of the fifth international ESERA conference on contributions of research to enhancing students' interest in learning science* (p. 830–834). Barcelona, Spain.
- Fishwild, J. E. (2005). *Modeling Instruction and the nature of Science* (Unpublished master's thesis, University of Wisconsin, Whitewater).
- Forbes, C. T. (2011). Preservice elementary teachers' adaptation of science curriculum materials for inquiry-based elementary science. *Science Education*, 95(5), 927–955.
- Fortin, M.-F. (1996). *Le processus de la recherche de la conception à la réalisation*. Ville Mont-Royal : Décarie éditeur inc.
- France, B. (2000). The Role of Models in Biotechnology Education: An Analysis of Teaching Models. Dans J. Gilbert et C. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 271–288). Dordrecht, Netherlands: Kluwer.
- Franco, C., et Colinviaux, D. (2000). Grasping mental models. Dans J. K. Gilbert et C. J. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 93–118). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Frankfurt, H. G. (1958). Peirce's notion of abduction. *The journal of philosophy*, 55(14), 593–597.
- Freyssinet-Dominjon, J. (1997). *Méthode de recherche en sciences sociales*. Paris : Montchrestien.
- Friedrich, J. (2001). Quelques réflexions sur le caractère énigmatique de l'action. Dans J. M. Beaudoin et J. Friedrich (Éd.), *Théories de l'action et éducation* (p. 93–112). Bruxelles, Belgique : De Boeck Supérieur.
- Fourez, G. et Englebert-Lecomte, V. (1999). Enseigner les démarches scientifiques. *Probio-Revue*, 22(1), 3-15.
- Fourez, G., Englebert-Lecomte, V. et Mathy, P. (1997). *Nos savoirs sur nos savoirs, un lexique d'épistémologie pour l'enseignement*. Bruxelles : De Boeck Université.
- Gagnon, Y.-C. (2012). *L'étude de cas comme méthode de recherche*. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Gaidioz, P., et Tiberghien, A. (2003). Un outil d'enseignement privilégiant la modélisation. *Bulletin de l'union des physiciens*, 97(850), 71–83.
- Gaidioz, P., Vince, J., et Tiberghien, A. (2004). Aider l'élève à comprendre le fonctionnement de la physique et son articulation avec la vie quotidienne. *Bulletin de l'union des physiciens*, 98(866), 1029–1042.
- Galili, I., et Hazan, A. (2000). The influence of an historically oriented course on students' content knowledge in optics evaluated by means of facets-schemes analysis. *American journal of physics*, 68(7), S3-S15.
- Gandit, M., Triquet, E., et Guillaud, J.-C. (2010). *Démarches scientifiques, démarches d'investigation en sciences expérimentales et en mathématiques : Représentations d'enseignants stagiaires de l'IUFM*. Communication présentée dans le cadre du Congrès international de l'AREF (Actualité de la recherche en éducation et en formation), Université de Genève, Genève, 13-16 sept.
- Genin, C., Michaud-Bonnet, J., et Pellet, A. (1987). Représentations des élèves en mathématiques et en physique sur les vecteurs et les grandeurs vectorielles lors de la transition collège-lycée. *Petit x*, 14-15, 39-63.
- Gentner, D., et Stevens, A. L. (1983). *Mental models*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Genzling, J.-C., et Pierrard, M.-A. (1994). La modélisation, la description, la conceptualisation, l'explication et la prédiction. Dans J. L. Martinand (Éd.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 47–78). Paris : INRP.
- Gibaud, A., et Henry, M. (1999). *Mécanique du point : Cours et exercices avec solutions* (Cours de physique). Paris : Dunod.

- Giere, R. N. (1988). *Explaining science: a cognitive approach*. Chicago: University of Chicago Press.
- Giere, R. N. (1992). *Cognitive models of science* (Vol. 15). Minnesota: University of Minnesota Press, Minneapolis Minnesota Studies in the Philosophy of Science.
- Giere, R. N. (1999). Using models to represent reality. Dans L. Magnani, N. J. Nersessian, et P. Thagard (Éd.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 41–58). New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Giere, R. N. (2004). How models are used to represent reality. *Philosophy of Science*, 71, 742–752.
- Gilbert, J. K. (2004). Models and modelling: Routes to more authentic science education. *International journal of science and mathematics education*, 2(2), 115–130.
- Gilbert, J. K., et Boulter, C. (1998). Learning science through models and modelling. Dans B. J. Fraser et K. G. Tobin (Éd.), *International handbook of science education* (p. 53–66). Dordrecht: Kluwer Academic.
- Gilbert, J. K., et Boulter, C. (2000). *Developing Models Science Education*. Dordrecht: Kluwer.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., et Elmer, R. (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. Dans J. K. Gilbert et C. J. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 3–18). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., et Rutherford, M. (1998a). Models in explanations, Part 1: Horses for courses? *International journal of science education*, 20(1), 83–97.
- Gilbert, J. K., Boulter, C., et Rutherford, M. (1998b). Models in explanations, Part 2: Whose voice? Whose ears? *International journal of science education*, 20(2), 187–203.
- Gilbert, S. W. (1991). Model building and a definition of science. *Journal of research in science teaching*, 28(1), 73–79.
- Giordan, A., et De Vecchi, G. (1987). *Les origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Neuchâtel-Paris : Delachaux et Niestlé.
- Givry, D. (2003). *Étude de l'évolution des idées des élèves de seconde durant une séquence d'enseignement sur les gaz* (Thèse de doctorat, Université Lyon, France).
- Glynn, S. M. (1991). Explaining science concepts: A teaching-with-analogies model. Dans S. Glynn, R. Yeany, et B. Britton (Éd.) (p. 219–240). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gobert, J. (2003). *Students' Collaborative Model-Building and Peer Critique On-line*. Presented at the National Association for Research in Science Teaching, Philadelphia, PA, March 23–26.
- Gobert, J., et Buckley, B. (2000). Special issue editorial: Introduction to model-based teaching and learning. *International journal of science education*, 22, 891–894.
- Gobert, J. D., et Clement, J. J. (1999). Effects of student-generated diagrams versus student-generated summaries on conceptual understanding of causal and dynamic knowledge in plate tectonics. *Journal of research in science teaching*, 36(1), 39–53.
- Gobert, J. D., O'Dwyer, L., Horwitz, P., Buckley, B. C., Levy, S. T., et Wilensky, U. (2011). Examining the relationship between students' understanding of the nature of models and conceptual learning in biology, physics, and chemistry. *International journal of science education*, 33(5), 653–684.
- Gobert, J. D., et Pallant, A. (2004). Fostering students' epistemologies of models via authentic model-based tasks. *Journal of science education and technology*, 13(1), 7–22.
- Gobert, J., et Discenna, J. (1997). The Relationship between Students' Epistemologies and Model-Based Reasoning. Paper presented at the *American Educational Research Association*, Chicago.
- Gooding, D., Pinch T. et Schaffer, S. (1989). *The uses of experiment - Studies in the natural sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Goldberg, F. M., et Anderson, J. H. (1989). Student difficulties with graphical representations of negative values of velocity. *Physics Teacher*, 27, 254–260.
- Gouvernement du Québec. (1992). *Programme d'études de physique 534 (À la découverte de la matière et de l'énergie)*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec.



- Gouvernement du Québec. (1996). *Les États généraux sur l'éducation. Exposé de la situation*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec.
- Gouvernement du Québec. (1997). *L'école, tout un programme. Énoncé de politique et plan d'action*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec.
- Gouvernement du Québec. (2001). *La formation à l'enseignement. Les orientations, les comptences professionnelles*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec.
- Gouvernement du Québec. (2004). *Programme de formation de l'école québécoise. Enseignement secondaire, 1er cycle*. Québec : Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Gouvernement du Québec. (2007a). *L'approbation du matériel didactique*. Québec : Ministère de l'éducation du Québec. Repéré à <http://www3.meq.gouv.qc.ca/bamd/info.htm>.
- Gouvernement du Québec. (2007b). *Programme de formation de l'école québécoise. Enseignement secondaire, 2<sup>e</sup> cycle*. Québec : Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Gouvernement du Québec. (2009). *Programme de physique, enseignement secondaire, 2<sup>e</sup> cycle*. Québec : Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Grandy, R., et Duschl, R. A. (2007). Reconsidering the character and role of inquiry in school science: Analysis of a conference. *Science et education*, 16(2), 141–166.
- Grandy, R. E. (1992). Information, observation, and measurement from the viewpoint of a cognitive philosophy of science. Dans N. Giere (Ed.), *Cognitive models of science* (p. 187-206). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Grandy, R. E. (2003). What are models and why do we need them? *Science et education*, 12(8), 773–777.
- Grangeat, M. (2013). Modéliser les enseignements scientifiques fondés sur les démarches d'investigation : développement des compétences professionnelles, apport du travail collectif. Dans M. Grangeat (Éd.), *Les enseignants de sciences face aux démarches d'investigation* (p. 155-184). Grenoble : Presses Universitaires de Grenoble.
- Grosslight, L., Unger, C., et Jay, E. (1991). Understanding Models and Their Use in Science: Conceptions of Middle and High School Students and Experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799–822.
- Gruber, C., et Benoit, W. (1998). *Mécanique générale* (Nouv. éd., revue et augmentée, 2<sup>e</sup> éd., Physique. Presses polytechniques romandes). Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Guay, J. (1991). L'approche proactive et l'intervention de crise. *Santé mentale au Québec*, 16(2), 139–154.
- Guichard, J. (1994). Réaction de J. Guichard à partir du texte de J.C. Genzling et M.A. Pierrard et de la grille de lecture de G. Ruhmelhard. Dans J. L. Martinand (Éd.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 79-84). Paris: INRP.
- Hacking, I. (1983). *Representing an intervening*. Cambridge: University Press Cambridge.
- Halbwachs, F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.
- Halbwachs, F. (1975). La physique du maître entre la physique du physicien et la physique de l'élève. *Revue française de pédagogie*, 33(1), 19-29.
- Halloun, I. (2017). Inventories of basic conceptions in mechanics. Repéré à <http://www.halloun.net/authentic-assessment/>.
- Halloun, I. A. (1984). *The use of models in teaching newtonian mechanics* (Doctoral Dissertation Arizona State University, Tempe).
- Halloun, I. A. (2004). *Modeling theory in science education*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic.
- Halloun, I. A. (2007). Mediated modeling in science education. *Science et education*, 16(7-8), 653–697.
- Halloun, I. A., et Hestenes, D. (1985a). Common sense concepts about motion. *American journal of physics*, 53(11), 1056–1065.
- Halloun, I. A., et Hestenes, D. (1985b). The initial knowledge state of college physics students. *American journal of Physics*, 53(11), 1043–1055.
- Halloun, I. A., et Hestenes, D. (1987). Modeling instruction in mechanics. *American journal of physics*, 55(5), 455–462.

- Halloun, I., et Hestenes, D. (1998). Interpreting VASS dimensions and profiles for physics students. *Science et Education*, 7(6), 553–577.
- Hanson, N. R. (1958). *Patterns of discovery*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Harré, R. (1959). Metaphor, model and mechanism. *Proceedings of the Aristotelian Society*, 60, 101–122.
- Harré, R. (1960). *An Introduction to the Logic of Sciences*. London: Macmillan.
- Harré, R. (1970). *The principles of scientific thinking*. Chicago, IL: The University of Chicago Press.
- Harré, R. (1978). Models in Science. *Physics Education*, 13(5), 275–278.
- Harré, R. (1985). *The philosophies of science (2<sup>nd</sup> ed.)*. Oxford: Oxford University Press.
- Harris, T. (1999). A hierarchy of models and electron microscopy. Dans L. Magnani, N. J. Nersessian, et P. Thagard (Ed.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 139–148). New York: Kluwer Academic /Plenum Publishers.
- Harrison, A. G. (2001). Thinking and working scientifically: The role of analogical and mental models. Paper presented at the *Proceedings of the Australian Association for Research in Education Conference*.
- Harrison, A. G., et Treagust, D. F. (2000). A typology of school science models. *International journal of science education*, 22(9), 1011–1026.
- Hasni, A. (2000). Penser les disciplines de formation à l'enseignement primaire, c'est d'abord penser les disciplines scolaires. *Éducation et francophonie*, 28(2), 100–120.
- Hasni, A. (2010a). L'éducation à l'environnement et l'interdisciplinarité : de la contextualisation des savoirs à la scolarisation du contexte ? Dans A. Hasni et J. Lebeaume (Éd.), *Nouveaux enjeux de l'éducation scientifique et technologique : visées, contenus, compétences et pratiques* (p. 179–222). Ottawa : Presses de l'Université d'Ottawa.
- Hasni, A. (2010b). Modèles et modélisation en enseignement scientifique : quelques aspects prioritaires à considérer. *Spectre*, 40(1), 10–13.
- Hasni, A. (2011). Problématiser, contextualiser et conceptualiser en sciences : point de vue d'enseignants du primaire sur leur pratique de classe. Dans A. Hasni et G. Baillat (Éd.), *Pratiques d'enseignement des sciences et technologies : Regards sur la mise en œuvre des réformes curriculaires et sur le développement des compétences professionnelles des enseignants* (p. 105–140). Reims : Éditions et presses universitaires de Reims.
- Hasni, A., et Baillat, G. (2011). *Pratiques d'enseignement des sciences et technologies : Regards sur la mise en œuvre des réformes curriculaires et sur le développement des compétences professionnelles des enseignants*. Reims : Éditions et presses universitaires de Reims.
- Hasni, A., Bousadra, F., Belletête, V., Benabdallah, A., Corriveau, A., Dubé, C., ... Roy, P. (2015). L'étude des pratiques d'enseignement en sciences et technologies appliquée à un nombre élevé de séquences : choix, apports et défis méthodologiques (chapitre 7). Dans Y. Lenoir et R. Esquivel (Éd.), *Méthodes en acte dans l'analyse des pratiques d'enseignement : approches internationales. Tome 1. Les méthodes en usage à la chaire de recherche sur l'intervention éducatives et utilisées par des chercheurs qui y sont associés* (p. 191–222). Longueuil : Groupéditions Éditeurs.
- Hasni, A., Bousadra, F., et Marcos, B. (2011). L'enseignement par projets en sciences et technologies : de quoi parle-t-on et comment justifie-t-on le recours à cette approche ? *Nouveaux cahiers de la recherche en éducation*, 14(1), 7–28.
- Hasni, A., Bousadra, F., et Poulin, J.-E. (2012). Les liens interdisciplinaires vus par des enseignants de sciences et technologies et de mathématiques du secondaire au Québec. *Recherches en didactiques des sciences et des technologies*, 3(5), 131–156.
- Hasni, A., Bousadra, F., et Roy, P. (2012). L'analyse des pratiques d'enseignement des points de vue des savoirs disciplinaires et des démarches d'enseignement en sciences et technologies : choix et contraintes méthodologiques. Communication au colloque *Les méthodes d'analyse des pratiques d'enseignement : un regard comparatif international organisé par Y. Lenoir, Y et al., dans le cadre du XVII<sup>e</sup> Congrès international de l'Association mondiale des sciences de l'éducation (AMSE-AMCE-WAER) : Les recherches en éducation et en formation : enjeux et défis*, Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France, 3–8 juin.

- Hasni, A. et Bousadra, F. (2018). Les démarches d'investigation scientifique dans des classes de secondaire au Québec : défis théoriques et pratiques, Dans A. Hasni, F. Bousadra, F. et J. Lebeaume. *Les démarches d'investigation scientifique et de conception technologique : Regards croisés sur les curriculums et les pratiques en France et au Québec*. Montréal : Groupéditions éditeurs.
- Hasni, A., Lenoir, Y., Larose, F., Samson, G., Bousadra, F., et Dos Santos, C. (2008). Enseignement des sciences et technologies et interdisciplinarité : point de vue d'enseignants du secondaire au Québec. Dans A. Hasni et J. Lebeaume (Éd.), *Interdisciplinarité et enseignement scientifique et technologique* (p. 75-110). Sherbrooke/Lyon : CRP/INRP.
- Hasni, A., Roy, P., Franc, S., et Dumais, N. (2011). L'enseignement et l'apprentissage de la diffusion et de l'osmose au secondaire : étude de cas. Actes de colloque présenté aux *Troisièmes rencontres Sherbrooke-Montpellier*. Sherbrooke, Québec, Université de Sherbrooke, 7-8 octobre, 20 pages.
- Hasni, A., et Samson, G. (2008a). Développer les compétences en gardant le cap sur les savoirs. Deuxième partie : la diversité des démarches à caractère scientifique et leurs liens avec les savoirs disciplinaires. *Spectre*, 37(3), 22-25.
- Hasni, A., et Samson, G. (2008b). Développer les compétences en gardant le cap sur les savoirs. Première partie : place de la problématisation dans les démarches à caractère scientifique. *Spectre*, 37(2), 26-29.
- Hecht, E. (2000). *Physique* (Traduction française de la 1<sup>re</sup> édition américaine par T. Becherrawy, International Thomson Publishing Inc., 1996). Paris, Bruxelles : DeBoeck Université.
- Hempel, C. G. (1965). *Aspects of scientific explanation and other essays in the philosophy of science*. Macmillan, New York: The Free Press.
- Henderson, C. (2002). Common concerns about the force concept inventory. *The physics teacher*, 40(9), 542-547.
- Henze, I., Driel, J. H. van, et Verloop, N. (2007). Science Teachers' Knowledge about Teaching Models and Modelling in the Context of a New Syllabus on Public Understanding of Science. *Research in science education*, 37(2), 99-122.
- Hersant, M., et Orange-Ravachol, D. (2015). Démarche d'investigation et problématisation en mathématiques et en SVT : des problèmes de démarcation aux raisons d'une union. *Recherches en éducation*, 21, 95-107.
- Hesse, M. B. (1953). Models in physics. *The british journal for the philosophy of science*, 4(15), 198-214.
- Hesse, M. B. (1961). *Forces and fields: The concept of action at a distance in the history of physics*. London: Thomas Nelson et Sons.
- Hesse, M. B. (1963). *Models and analogies in science*. London: Sheed et Ward.
- Hestenes, D. (1987). Toward a modeling theory of physics instruction. *American journal of physics*, 55(5), 440-454.
- Hestenes, D. (1992). Modeling games in the Newtonian world. *American journal of physics*, 60(8), 732-748.
- Hestenes, D. (1995). Modeling software for learning and doing physics. Dans C. Bernardini (Éd.), *Thinking physics for teaching* (p. 25-65). New York: Plenum.
- Hestenes, D. (1997). Modeling methodology for physics teachers. Dans E. Redish et J. Rigden (Éd.), *The changing role of the physics department in modern universities* (p. 935-958). Woodbury, NY: American Institute of Physics.
- Hestenes, D. (2007). Modeling theory for math and science education. Paper presented at the *ICTMA-13: The International Community of Teachers of Mathematical Modelling and Applications*. Indiana, IL.
- Hestenes, D. (2010). Modeling theory for math and science education. Dans R. Lesh, P. Galbraith, C. Haines, et A. Hurford (Éd.), *Modeling students' mathematical modeling competencies* (p. 13-41). New York: Springer Press.
- Hestenes, D., et Halloun, I. (1995). Interpreting the force concept inventory. *The Physics Teacher*, 33(8), 502-506.
- Hestenes, D., et Wells, M. (1992). A mechanics baseline test. *The physics teacher*, 30(3), 159-166.
- Hestenes, D., Wells, M., et Swackhamer, G. A. (1992). Force concept inventory. *Physics Teacher*, 30, 141-158.

- Hiebert, J., Gallimore, R., Garnier, H., Givvin, K. B., Hollingsworth, H., Jacobs, J., ... Stigler, J. (2003). *Teaching Mathematics in Seven Countries: Results from the TIMSS 1999 Video Study*. U.S. Department of Education. Office of Educational Research and Improvement.
- Hodson, D. (1992). In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education. *International journal of science education*, 14(5), 541–562.
- Hodson, D. (1993). Re-thinking Old Ways: Towards A More Critical Approach To Practical Work In School Science. *Studies in science education*, 22, 85–142.
- Hsu, P.-L., et Roth, W.-M. (2009). An Analysis of Teacher Discourse that Introduces Real Science Activities to High School Students. *Research in science education*, 39(4), 553–574.
- Huber, P., et Tytler, K. (2013). Models and Learning Science. Dans K. Tytler, V. Prain, P. Hubber, et E. Waldrup (Éd.), *Constructing representations to learn in science* (p. 109–133). Rotterdam, Boston, Taipei: Sense Publishers.
- Hulin, M. (1992). *Le mirage et la nécessité, pour une redéfinition de la formation scientifique de base*. Paris : Presses de l'École Normale Supérieure, Palais de la Découverte.
- Izquierdo-Aymerich, M., et Adúriz-Bravo, A. (2003). Epistemological foundations of school science. *Science et education*, 12(1), 27–43.
- Jameau, A., et Boivelin, J.-M. (2015). Les déterminants de la construction et de la mise en œuvre de démarches d'investigation chez deux enseignants de physique-chimie au collège. *Recherches en Éducation*, 21, 109–121.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Johnsua, S., et Dupin, J. J. (1989). *Représentations et modélisations. Le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- Johnsua, S., et Dupin, J. J. (2003). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : Presses universitaires de France.
- Johnsua, S., et Dupin, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : Presses universitaires de France.
- Jonassen, D. (2004). Model building for conceptual change: Using computers as cognitive tools. Dans A. Gregoriadou, S. Rapti, et C. Kynigos (Éd.), *Information and communication technologies in education* (p. 3–17). Athens, Greece: New Technologies Publications.
- Jones, R. A. (2000). *Méthodes de recherche en sciences humaines*. Paris et Bruxelles : De Boeck Université.
- Jordan, B., et Henderson, A. (1995). Interaction Analysis: Foundations and Practice. *Journal of the Learning Sciences*, 4(1), 39–103.
- Justi, R., et Gilbert, J. (2000). History and philosophy of science through models: some challenges in the case of the atom'. *International journal of science Education*, 22(9), 993–1009.
- Justi, R., et Gilbert, J. (2003). Teachers' views on the nature of models. *International journal of science education*, 25(11), 1369–1386.
- Justi, R. S., et Gilbert, J. K. (2002a). Modelling, teachers' views on the nature of modelling, and implications for the education of modellers. *International journal of science education*, 24(4), 369–387.
- Justi, R. S., et Gilbert, J. K. (2002b). Science teachers' knowledge about and attitudes towards the use of models and modelling in learning science. *International journal of science education*, 24(12), 1273–1292.
- Kane, J. et Sternheim, M. (1997). *Physique : plus de 1900 problèmes et exercices plus de 800 solutions* (Traduction française de la 1<sup>re</sup> édition américaine par M. Delmelle, R. Evrard, J. Schmit et J.-P. Vigneron, InterÉditions, Paris, 1986). Paris : Masson.
- Karplus, R. (1977). Science teaching and the development of reasoning. *Journal of research in science teaching*, 14(2), 169–175.
- Kelly, G. J. (2011). Scientific literacy, discourse, and epistemic practices. Dans C. Linder, L. Ostman, D. A. Roberts, P. O. Wickman, G. Erickson, et A. MacKinnon (Éd.), *Exploring the landscape of scientific literacy* (p. 61–73). New York: Routledge.
- Khan, S. (2007). Model-based inquiries in chemistry. *Science education*, 9(16), 877–905.

- Klopfer, L. E. (1971). Evaluation of learning in science. Dans B. S. Bloom, J. T. Hastings, et G. F. Madaus (Éd.), *Handbook of formative and summative evaluation of student learning* (p. 559-642). London: McGraw-Hill.
- Kohler, A., et Chabloz, B. (2016). La modélisation dans l'apprentissage des sciences : une note de synthèse. Repéré sur le site web du projet de recherche institutionnel « Ingénierie didactique en physique, centré sur la modélisation et la simulation : construction et évaluation d'un dispositif d'enseignement mi-fini (half-baked) pour le secondaire II » de l'Unité de Recherche 2 de la HEP-BEJUNE : <http://modelisation-mi-fini.hep-bejune.ch>.
- Koponen, I. T. (2007). Models and Modelling in Physics Education: A Critical Re-Analysis of Philosophical Underpinnings and Suggestions for Revisions. *Science et education*, 16(7-8), 751-773.
- Krathwohl, D. R. (2002). A revision of Bloom's taxonomy: An overview. *Theory into practice*, 41(4), 212-218.
- Krathwohl, D. R., Bloom, B. S., et Masia, B. B. (1964). *Taxonomy of educational objectives, the classification of educational goals. Handbook II: affective Domain*. New York, NY: David McKay Co., Inc.
- Küçüközer, A. (2000). *Une compréhension de la notion d'interaction dans le cadre d'un enseignement de mécanique* (Mémoire du DEA Didactiques et Interactions, Université Lumière, Lyon, 2).
- Küçüközer, H. A. (2005). *L'étude de l'évolution de la compréhension conceptuelle des élèves avec un enseignement : cas de la mécanique en 1ère S* (Thèse de doctorat, Université Lyon 2, France).
- Kuhn, T. S. (1962). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- Labudde, P., Reif, F., et Quinn, L. (1988). Facilitation of scientific concept learning by interpretation procedures and diagnosis. *International journal of science education*, 10(1), 81-98.
- Lakatos, I. (1978). *The methodology of scientific research programmes: Volume 1: Philosophical papers* (Vol. 1). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Lakatos, I., et Musgrave, A. (1970). *Criticism and the Growth of Knowledge* (Vol. 4). London: Cambridge University Press.
- Landry, R. (1994). L'analyse de contenu. Dans B. Gauthier (Éd.) (p. 337-359). Sainte-Foy : Presses de l'université du Québec (2<sup>e</sup> éd.).
- Larcher, C. (1994). Étude comparative de démarches de modélisation. Quelles sont les caractéristiques des démarches de modélisation. Dans J. L. Martinand (Éd.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 9-24). Paris : INRP.
- Larcher, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. Dans J. Toussaint (Éd.), *Didactique appliquée de la physique-chimie* (p. 160-178). Nathan.
- Larcher, C. (2003). Contribution à la table ronde « cadres théoriques autour de la modélisation ». Dans V. Albe, C. Orange et L. Simonneaux (Eds.), *Actes des 3<sup>èmes</sup> rencontres scientifiques de l'ARDIST : Recherches en didactique des sciences et des techniques : Questions en débat* (p. 305-308). Toulouse : ENFA.
- Larkin, D., King, D. T., et Kidman, G. C. (2012). Connecting indigenous stories with geology: Inquiry-based learning in a middle years classroom. *Teaching science*, 58(2), 39-44.
- Laudan, L. (1977). *La dynamique de la science*. Bruxelles : Éditions Mardaga.
- Leatherdale, W. H. (1974). *The role of analogy, model and metaphor in science*. Oxford: North-Holland.
- Lebrun, J. (2013). Quelle problématisation dans les manuels scolaires québécois du primaire en sciences humaines ? *Canadian journal of education/Revue canadienne de l'éducation*, 36(4), 299-326.
- Lebrun, J., Hasni, A. et Lebeaume, J. (2018). *L'usage des faits dans la construction de la réalité sociale et naturelle à l'école : enjeux scientifiques et socioéducatifs. Texte de cadrage relatif à un appel à contribution pour un numéro thématique*. CREAS, Université de Sherbrooke et Laboratoire EDA, Université Paris Descartes.
- Lederman, N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science: A review of the research. *Journal of research in science teaching*, 29(4), 331-359.

- Lederman, N. G. (2006). Syntax of nature of science within inquiry and science instruction. Dans L. B. Flick et N. G. Lederman (Éd.), *Scientific inquiry and nature of science: Implications for teaching, learning, and teacher education* (p. 301-317). Dordrecht: Springer.
- Lehrer, R., et Schauble, L. (2003). Origins and evolution of model-based reasoning in mathematics and science. Dans R. Lesh et H. M. Doerr (Éd.), *Beyond constructivism: Models and modeling perspectives on mathematics problem solving, teaching, and learning* (p. 59-70). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lehrer, R., et Schauble, L. (2006). Scientific thinking and science literacy: Supporting development in learning in contexts. Dans W. Damon, R. M. Lerner, K. A. Renninger, et I. E. Sigel (Éd.). Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Lemeignan, G., et Weil-Barais, A. (1988). Gestion d'activités de modélisation en classe. *Aster*, 7, 121-141.
- Lenoir, Y. (2014). *Les médiations au coeur des pratiques d'enseignement-appren-tissage : une approche dialectique. Des fondements à leur actualisation en classe. Éléments pour une théorie de l'intervention éducative*. Longueuil : Groupéditions Éditeurs.
- Lenoir, Y. (2015). Les méthodes d'analyse des pratiques d'enseignement de la Chaire de recherche du Canada sur l'intervention éducative : une vue d'ensemble (chapitre 1). Dans Y. Lenoir et R. Esquivel (Éd.), *Les méthodes en acte dans l'analyse des pratiques d'enseignement : approches internationales. Tome 1. Les méthodes en usage à la chaire de recherche sur l'intervention éducatives et utilisées par des chercheurs qui y sont associés* (p. 35-57). Longueuil : Groupéditions Éditeurs.
- Lenoir, Y., Larose, F., Deaudelin, C., Kalubi, J. C., et Roy, G. R. (2002). L'intervention éducative : clarifications conceptuelles et enjeux sociaux. Pour une reconceptualisation des pratiques d'intervention en enseignement et en formation à l'enseignement. *Esprit critique*, 4(4), 7-22.
- Lenoir, Y., Maubant, P., Hasni, A., Lebrun, J., Zaid, A., Habboub, E., et McConnell, A. C. (2007). *À la recherche d'un cadre conceptuel pour analyser les pratiques d'enseignement. Documents du CRIE et de la CRCIE*. Sherbrooke : Université de Sherbrooke.
- Lenoir, Y. et Sauvé, L. (1998). Note de synthèse. De l'interdisciplinarité scolaire à l'interdisciplinarité dans la formation à l'enseignement : un état de la question [2 - Interdisciplinarité scolaire et formation interdisciplinaire à l'enseignement]. *Revue française de pédagogie*, 125(1), 109-146.
- Lenoir, Y., et Vanhulle, S. (2006). Étudier la pratique enseignante dans sa complexité : une exigence pour la recherche et la formation à l'enseignement. Dans A. Hasni, Y. Lenoir, et J. Lebeaume (Éd.), *La formation à l'enseignement des sciences et des technologies au secondaire dans le contexte des réformes par compétences* (p. 193-245). Québec : Presses de l'Université du Québec.
- Lesh, R., et Doerr, H. M. (2000). Symbolizing, communicating, and mathematizing: Key components of models and modeling. Dans P. Cobb, E. Yackel, et K. McClain (Éd.), *Symbolizing and communicating in mathematics classrooms: Perspectives on discourse, tools, and instructional design* (p. 361-384). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Lhoste, Y. (2004). *Problématisation et pratiques langagières lors du débat scientifique en SVT sur le thème de la nutrition au collège* (Mémoire de DEA en sciences de l'éducation et didactiques non publié, Université de Nantes, Nantes, France).
- Lhoste, Y. (2005). Argumentation sur les possibles et construction du problème dans le débat scientifique en classe de 3<sup>e</sup> sur le thème de la nutrition. *Aster*, 40, 153-176.
- Lhoste, Y. (2006). La construction du concept de circulation sanguine en 3<sup>e</sup> : Problématisation, argumentation et conceptualisation dans un débat scientifique. *Aster*, 42, 78-108.
- Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissages dans les sciences de la vie. Étude de débats scientifiques dans la classe dans deux domaines biologiques : nutrition et évolution* (Thèse de doctorat en sciences de l'éducation non publiée, Université de Nantes, Nantes).
- Lhoste, Y. (2017). *Épistémologie et didactique des SVT*. Bordeaux : Presses universitaires de Bordeaux.
- Liard, M. L. (1904). *Les sciences et l'enseignement secondaire. Conférences du Musée pédagogique*. Paris : Imprimerie nationale.
- Machamer, P. (2000). The nature of metaphor and scientific description. Dans F. Hallyn (Éd.), *Metaphor and Analogy in the Sciences* (p. 35-52). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

- Magee, P. A., et Flessner, R. (2012). Collaborating to improve inquiry-based teaching in elementary science and mathematics methods courses. *Science education international*, 23(4), 353–365.
- Malgrange, J. L., Saltiel, E., et Viennot, L. (1973). Vecteurs, scalaires et grandeurs physiques. *Bulletin SFP. Encart pédagogique*, 3–13.
- Malkoun, L. (2007). *De la caractérisation des pratiques de classes de physique à leur relation aux performances des élèves : étude de cas en France et au Liban* (Thèse de doctorat, Université Lyon 2, France).
- Malkoun, L., Vince, J., et Tiberghien, A. (2007). *Relations entre pratiques d'enseignement de la physique au lycée et performances des élèves : cas de l'enseignement de la mécanique*. Communication présentée dans le cadre des Cinquième rencontres nationales de l'ARDIST, La Grande Motte, France, 17 -19 octobre.
- Marcel, J.-F. (2002). Le concept de contextualisation : un instrument pour l'étude des pratiques enseignantes. *Revue française de pédagogie*, 138(1), 103–113.
- Martin, L. (2010). *Relationship between teacher preparedness and inquiry-based instructional practices to students' science achievement: Evidence from TIMSS 2007* (Doctoral dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia).
- Martinand, J. L. (1987). *Modèle et simulation ; en guise d'introduction*. Dans A. Giordan et J.-L. Martinand (Éd.), *Modèles et simulation : Actes des neuvièmes journées internationales sur l'éducation scientifique* (p. 34-43), Université Paris 7, Paris, France.
- Martinand, J. L. (1994). La didactique des sciences et de la technologie et la formation des enseignants. *Aster*, 19, 61 -75.
- Martinand, J.-L. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- Martinand, J.-L. (1996). Introduction à la modélisation. Dans J.-L. Martinand (Éd.), *Actes du séminaire de didactique des disciplines technologiques 1994-95* (p. 1-12). Paris, France : Liaison interuniversitaire pour la recherche en éducation scientifique et technologique.
- Matthews, M. R. (2007). Models in science and in science education: an introduction. *Science et education*, 16(7-8), 647–652.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., et Zee, E. H. van. (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics: examples from kinematics. *American journal of physics*, 55(6), 503-513.
- Megalakaki, O., et Tiberghien, A. (2011). A qualitative approach of modelling activities for the notion of energy. *Electronic journal of research in educational psychology*, 9(1), 157–182.
- Méheut, M., et Psillos, D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International journal of science education*, 26(5), 515–535.
- Mellado, V. (1998). The classroom practice of preservice teachers and their conceptions of teaching and learning science. *Science education*, 82(2), 197-214.
- Mellar, H., Bliss, J., Boohan, R., Ogborn, J., et Tompsett, C. (1994). *Learning with artificial worlds: Computer based modeling in the curriculum*. Washington, DC: The Falmer Press.
- Meltzer, D. E. (2005). Relation between students' problem-solving performance and representational format. *American Journal of physics*, 73(5), 463–478.
- Mercier, A. (1945). *Introduction à la physique et à la mécanique*. Neuchâtel : Ed. du Griffon.
- Mercier, A., et Buty, C. (2004). Évaluer et comprendre les effets de l'enseignement sur les apprentissages des élèves : problématiques et méthodes en didactique des mathématiques et des sciences. *Revue française de pédagogie*, 148(1), 47–59.
- Mercier, A., Schubauer-Leoni, M. L., et Sensevy, G. (2002). Vers une didactique comparée. *Revue française de pédagogie*, 141(1), 5–16.
- Mercier, A., Schubauer-Leoni, M.-L., Donck, E., et Amigues, R. (2005). The Intention to Teach and School Learning: The Role of Time. USA, Canada, Switzerland: Hogrefe et Huber.
- Michalchik, V., Rosenquist, A., Kozma, R., Kreikemeier, P., et Schank, P. (2008). Representational resources for constructing shared understanding in the high school chemistry classroom. Dans J. K. Gilbert, M. Reiner, et M. Nakhleh (Éd.), *Visualization: theory and practice in science education* (pp. 233-282). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

- Minstrell, J. (1992a). *Facets of students' knowledge and relevant instruction*. Paper presented at the *International Workshop: Research in Physics Learning - Theoretical Issues and Empirical Studies*, Kiel, Germany.
- Minstrell, J. (1992b). *Facets of Students' Thinking*. Paper presented at the *International Workshop: Research in Physics Learning - Theoretical Issues and Empirical Studies*, Kiel, Germany.
- Mondada, L. (2006). Multiactivité, multimodalité et séquentialité : l'initiation de cours d'action parallèles en contexte scolaire. Dans M.-C. Guernier, V. Durand-Guerrier, et J.-P. Robitaille (Éd.), *Interactions verbales, didactiques et apprentissage* (p. 45–72). Besançon : Presses Universitaires de Franche Comté.
- Mortimer, E. F. (1998). Multivoicedness and Univocality in Classroom Discourse: An Example from Theory of Matter. *International journal of science education*, 20(1), 67–82.
- Mortimer, E. F., Massicame, T., Tiberghien, A., et Buty, C. (2007). Una metodologia para caracterizar os generos de discurso como tipos de estrategias enunciativas nas aulas de Ciencias. *A pesquisa em ensino de ciências no Brasil: alguns recortes*, 1, 53-94.
- Mortimer, E. F., et Scott, P. H. (2003). *Meaning making in secondary sciences classrooms*. Buckingham: Open University Press.
- Moscovici, S., et Buschini, F. (2003). *Les méthodes des sciences humaines*. Presses universitaires de France.
- Nersessian, N. J. (1995). Should physicists preach what they practice? *Science et Education*, 4(3), 203–226.
- Nersessian, N. J. (1999). Model-based reasoning in conceptual change. Dans L. Magnani, N. J. Nersessian, et P. Thagard (Éd.), *Model-based reasoning in scientific discovery*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publisher.
- Nersessian, N. J. (2002). The cognitive basis of model-based reasoning in science. Dans P. Carruthers, S. Stich, et M. Siegal (Éd.), *The cognitive basis of science* (p. 133–153). Cambridge: Cambridge University Press.
- Niedderer, H., Budde, M., Givry, D., Psillos, D., et Tiberghien, A. (2007). Learning process studies. Dans R. Pintò et D. Couso (Éd.), *Contributions from science education research* (p. 159-171). Berlin : Springer.
- Niedderer, H., Budde, M., Givry, D., Psillos, D., Tiberghien, A., et Mälardalens, H. (2005). Learning process studies. Dans R. Pintò et D. Couso (Éd.), *Proceedings of the fifth international ESERA conference on contributions of research to enhancing students' interest in learning science* (p. 451–463). Barcelona, Spain.
- Norman, D. A. (1983). Some observations on mental models. Dans D. Gentner et A. L. Stevens (Éd.), *Mental models* (p. 7-14). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Ogan-Bekiroglu, F., et Belek, D. E. (2014). Impact of Model-Based Teaching on Argumentation Skills Feral Ogan-Bekiroglu. *International journal of progressive education*, 10(1), 59–72.
- Oh, P. S., et Oh, S. J. (2012). What teachers of science need to know about models: an overview. *International journal of science education*, 33(8), 1109–1130.
- Ohlsson, S. (1996). Learning to do and learning to understand: a lesson and a challenge for cognitive modeling. Dans P. Reiman et H. Spada (Éd.), *Learning in humans and machine* (p. 37-62). Oxford: Pergamon Elsevier Science.
- Orange, C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. Dans J. L. Martinand (Éd.), *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences* (p. 25-43). Paris : INRP.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie : quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : Presses universitaires de France.
- Orange, C. (2003). Débat scientifique dans la classe, problématisation et argumentation: le cas d'un débat sur la nutrition au cours moyen. *Aster*, 37, 83–107.
- Orange, C. (2005). Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les sciences de l'éducation-pour l'ère nouvelle*, 38(3), 69–94.



- Orange, C. (2007). Quel milieu pour l'apprentissage par problématisation en sciences de la vie et de la Terre. *Éducation et didactique*, 1(2), 37-55.
- Orange, C. (2013). L'apprentissage des sciences : entre contextes et abstraction ? Dans F. Anciaux, T. Forissier, et L.-F. Prudent (Éd.), *Contextualisations didactiques : approches théoriques* (p. 189-224). Paris : L'Harmattan.
- Orange, C., Lhoste, Y., et Orange-Ravachol, D. (2008). Argumentation, problématisation et construction de concepts en classe de sciences. Dans C. Buty et C. Plantin (Éd.), *L'argumentation en classe de sciences* (p. 75-116). Lyon: INRP.
- Ornek, F. (2006). *Modeling-based interactive engagement in an introductory physics course: Students' conceptions and problem solving ability* (Doctoral dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana).
- Osborne, J., Erduran, S., Simon, S., et Monk, M. (2001). Enhancing the quality of argument in school science. *School science review*, 82(301), 63-70.
- Panse, S., et Kumar, A. (1994). Alternative conceptions in galilean relativity: frames of reference. *International journal of science education*, 16(1), 63-82.
- Penner, D. E. (2001). Chapter 1: Cognition, computers, and synthetic science: Building knowledge and meaning through modelling. *Review of research in education*, 25(1), 1-36.
- Pérez, J. (1989). *Mécanique : Points matériels, solides, fluides, avec exercices et problèmes résolus* (2<sup>e</sup> éd. revue et augmentée, Enseignement de la physique). Paris, Milan : Masson.
- Philippi, K. (2010). *An examination of student understanding of the use of models in science and conceptual understanding of electricity and magnetism* (Doctoral dissertation, University of New Orleans, New Orleans lakefront, Louisiana).
- Piaget, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Paris : PUF.
- Picavet, E. (1995). *Approches du concret, une introduction à l'épistémologie*. Paris : Ellipses.
- Pickering, A. (1992). Living in the material world. Dans Gooding G., Pinch T., Schaffer S. (Eds), *The uses of experiment - studies in the natural sciences* (p. 275-297). Cambridge: Cambridge University Press.
- Plevyak, L. H. (2007). What do preservice teachers learn in an inquiry-based science methods course? *Journal of elementary science education*, 19(1), 1-12.
- Popper, K. (1971). *La connaissance objective*. Paris : Aubier.
- Popper, K. R. (2002). *The logic of scientific discovery (translation of Logik der Forschung, 1935)*. Routledge, London: Routledge Classics.
- Portides, D. P. (2007). The relation between idealisation and approximation in scientific model construction. *Science et education*, 16(7-8), 699-724.
- Quivy, R., et Campenhoudt, L. V. (2006). *Manuel de recherche en sciences sociales* (3<sup>e</sup> édition). Paris : Dunod.
- Ramadas, J., Barve, S., et Kumar, A. (1996). Alternative conceptions in Galilean relativity: inertial and non-inertial observers. *International journal of science education*, 18(5), 615-629.
- Redish, E. F. (1994). Implications of cognitive studies for teaching physics. *American journal of physics*, 62(9), 796-803.
- Reif, F., et Allen, S. (1992). Cognition for interpreting scientific concepts: A study of acceleration. *Cognition and Instruction*, 9(1), 1-44.
- Renk, J. M., Granch, R. C., et Chang, E. (1993). Visual Information Strategies in Mental Model Development. Paper presented at the *Visual Literacy in the Digital Age: Selected Readings from the Annual Conference of the International Visual Literacy Association*, Rochester, New York, October 13-17.
- Reuter, Y., Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre, I., et Lahanier-Reuter, D. (2007). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques*. Bruxelles : De Boeck.
- Riopel, M., Raïche, G., Potvin, P., Fournier, F., et Nonnon, P. (2006). Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur. *Aster*, 43, 57-80.
- Robardet, G. (1989). Utiliser des situations-problèmes pour enseigner les sciences physiques. *Petit x*, 23, 61-70.

- Robardet, G. (1990). Enseigner les sciences physiques à partir de situations-problèmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 720, 17–28.
- Robardet, G. (1995). Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia*, 7, 129-143.
- Robardet, G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique. *Bulletin de l'union des physiciens*, 95(836), 1173–1190.
- Robardet, G., et Guillaud, J.-C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques*. Paris, France : Presses Universitaires de France.
- Robert, A. (2007). Recherches sur les pratiques des enseignants de mathématiques du second degré en classe : des activités des élèves aux formations d'enseignants. *Didaskalia*, 15, 123-157.
- Robert, A. D., et Bouillaguet, A. (1997). *L'analyse de contenu. Que sais-je ?* France : Presses universitaires de France.
- Robert, A., et Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian journal of science, mathematics and technology education*, 2(4), 505-528.
- Rotbain, Y., Marbach-Ad, G., et Stavy, R. (2006). Effect of bead and illustrations models on high school students' achievement in molecular genetics. *Journal of research in science teaching*, 43(5), 500–529.
- Roth, K. J., Druker, S. L., Garnier, H. E., Lemmens, M., Chen, C., Kawanaka, T., ... California, S. U. (2006). *Teaching science in five countries: Results from the TIMSS 1999 Video Study. Statistical Analysis Report. NCES 2006-011*. U.S. Department of Education. National Center for Education Statistics. Repéré à <https://nces.ed.gov/pubs2006/2006011.pdf>.
- Roth, K. J., Garnier, H. E., Chen, C., Lemmens, M., Schwiller, K., et Wickler, N. I. Z. (2011). Videobased lesson analysis: effective science PD for teacher and student learning. *Journal of research in science teaching*, 48(2), 117-148.
- Roy, P., et Hasni, A. (2014). Les modèles et la modélisation vus par des enseignants de sciences et technologies du secondaire au Québec. *McGill journal of education/Revue des sciences de l'éducation de McGill*, 49(2), 349–371.
- Saltiel, E. (1978). *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences* (Thèse de doctorat, Université de Paris VII, Paris, France).
- Saltiel, E., et Malgrange, J. L. (1979). Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. *Bulletin de l'union des physiciens*, 616, 1325–1355.
- Saltiel, E., et Malgrange, J. L. (1980). « Spontaneous » ways of reasoning in elementary kinematics. *European journal of physics*, 1(2), 73.
- Sanchez, É. (2008). Quelles relations entre modélisation et investigation scientifique dans l'enseignement des sciences de la terre ? *Éducation et didactique*, 2(2), 93–118.
- Sanchez, E., Prieur, M., et Fontanieu, V. (2007). *Modèles et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre au lycée : Points de vue et pratiques d'enseignants*. Communication présentée dans le cadre des Cinquième rencontres nationales de l'ARDIST (p. 345–351), La Grande Motte, France, 17-19 octobre.
- Sanmarti, N. (2002). The cognitive turn in the new philosophy of science. Dans N. Sanmarti (Éd.), *Didáctica de las ciencias en la educación secundaria obligatoria* (p. 45-49). Madrid: Síntesis.
- Santini, J., et Sensevy, G. (2010). Les interactions didactiques dans la dialectique jeux d'apprentissage–jeux épistémiques. Une étude de cas à l'école primaire. Dans Colloque international *Spécificités et diversité des interactions didactiques : disciplines, finalités, contextes*, Université de Lyon-ICAR-CNRS-INRP, 24-26 juin 2010.
- Savinainen, A., et Scott, P. (2002). The Force Concept Inventory: a tool for monitoring student learning. *Physics Education*, 37(1), 45-52.
- Schmidt-Lainé, C., et Pavé, A. (2008). La modélisation au coeur de la démarche scientifique et à la confluence des disciplines. *Les cahiers du Musée des confluences*, 2, 21–34.

- Schneeberger, P., Robisson, P., Liger-Martin, J., et Darley, B. (2007). Conduire un débat pour faire construire des connaissances en sciences. *Aster*, 45, 39-64.
- Schubauer-Leoni, M.-L., Leutenegger, F., Ligozat, F., et Annick, F. (2007). Un modèle de l'action conjointe professeur-élèves : les phénomènes didactiques qu'il peut/doit traiter. Dans G. Sensevy et G. Mercier (Éd.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Schwarz, C. V. (2002). *Using model-centred science instruction to foster students' epistemologies in learning with models*. Paper presented at the *Annual meeting of the American Educational Research Association*, New Orleans, LA, April 1-5.
- Schwarz, C. V., Reiser, B. J., Davis, E. A., Kenyon, L., Acher, A., Fortus, D., ... Krajcik, J. (2009). Developing a learning progression for scientific modeling: making scientific modeling accessible and meaningful for learners. *Journal of research in science teaching*, 46(6), 632-654.
- Schwarz, C. V., et White, B. (1999). What do seventh grade students understand about scientific modeling from a model-oriented physics curriculum? Paper presented at the *National Association for Research in Science Teaching*, Boston, MA, March 28-31.
- Schwarz, C. V., et White, B. Y. (2005). Metamodeling knowledge: Developing students' understanding of scientific modeling. *Cognition and instruction*, 23(2), 165-205.
- Scott, P. H., Mortimer, E. F., et Aguiar, O. G. (2006). The tension between authoritative and dialogic discourse: A fundamental characteristic of meaning making interactions in high school science lessons. *Science education*, 90(4), 605-631.
- Seck, M. (2007). *Comparaison des pratiques de classes dans le cas de l'enseignement de l'énergie en première scientifique (grade 11) : analyse à l'aide du logiciel Transana* (Thèse de doctorat, Université Lyon 2, Lyon, France).
- Seidel, T., et Prenzel, M. (2006). Stability of Teaching Patterns in Physics Instruction: Findings from a Video Study. *Learning and instruction*, 16(3), 228-240.
- Seidel, T., Prenzel, M., et Kobarg, M. (2005). *How to run a video study, Technical report of the IPN Video Study*. Mannster: Waxmann.
- Seidel, T., Sturmer, K., Blomberg, G., Kobarg, M., et Schwindt, K. (2011). Teacher Learning from Analysis of Videotaped Classroom Situations: Does It Make a Difference Whether Teachers Observe Their Own Teaching or that of Others? *Teaching and teacher education: An international journal of research and studies*, 27(2), 259-267.
- Sensevy, G. (2001). Théories de l'action et action du professeur. Dans J. M. Baudouin et J. Friedrich (Éd.), *Théories de l'action et éducation* (p. 203-224). Bruxelles : De Boeck.
- Sensevy, G. (2007). Des catégories pour décrire et comprendre l'action didactique. Dans G. Sensevy et A. Mercier (Éd.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves* (p. 13-49). Rennes : Presses universitaires de Rennes.
- Sensevy, G. (2008). Le travail du professeur pour la théorie de l'action conjointe en didactique : une activité située ? *Recherche et Formation*, 58, 39-50.
- Sensevy, G. (2011). *Le sens du savoir : éléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique*. Bruxelles : De Boeck.
- Sensevy, G., et Mercier, A. (2007). *Agir ensemble : Eléments de théorisation de l'action conjointe du professeur et des élèves*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Sensevy, G., et Quilio, S. (2002). Les discours du professeur. Vers une pragmatique didactique. *Revue française de pédagogie*, 141, 47-56.
- Sensevy, G., Schubauer-Leoni, M.-L., Mercier, A., Ligozat, F., et Perrot, G. (2005). An Attempt to Model the Teacher's Action in the Mathematics Class. *Educational studies in mathematics*, 59(1-3), 153-181.
- Serway, R., & Boisvert, C. (1992). *Physique* (3<sup>e</sup> ed., Serway, Raymond A. - Physique 1). Bruxelles : De Boeck Université ; Laval : Ed. Etudes Vivantes.
- Sgard, A., Jenni, Ph., Solari, M., & Varcher, P. (2017). Le problème c'est de le poser. Définitions, modèles, perspectives pour la géographie scolaire. *Formation et pratiques d'enseignement en questions*, 22, 39-57.

- Shaffer, P. S., et McDermott, L. C. (2005). A research-based approach to improving student understanding of the vector nature of kinematical concepts. *American journal of physics*, 73, 921–931.
- Shen, J., et Confrey, J. (2007). From conceptual change to transformative modeling: A case study of an elementary teacher in learning astronomy. *Science education*, 91(6), 948–966.
- Smit, J. J. A., et Finegold, M. (1995). Models in physics: Perceptions held by final-year prospective physical science teachers studying at South African universities. *International journal of science education*, 17(5), 621–634.
- Smith, C. L., Maclin, D., Houghton, C., et Hennessey, M. G. (2000). Sixth-grade students' epistemologies of science: The impact of school science experiences on epistemological development. *Cognition and instruction*, 18(3), 349–422.
- Spielberg, N., et Anderson, B. D. (1995). Books-Received-Seven Ideas that Shook the Universe. *Science*, 268, 12–24.
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. Thousand Oaks, CA: Sage publications.
- Stake, R. E. (2005). Qualitative Case Studies. Dans N. K. Dezin et Y. S. Lincoln (Éd.), *The Sage handbook of qualitative research* (3<sup>e</sup> édition, p. 443–466). Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Stenberg, R. J. (1985). Human intelligence: The model is the message. *Science*, 230, 1111–1118.
- Stewart, J., Cartier, J. L., et Passmore, C. M. (2005). Developing understanding through model-based inquiry. Dans M. S. Donovan et J. D. Bransford (Éd.), *How students learn* (p. 515–565). Washington, DC: National Research Council.
- Stigler, J., et Hiebert, J. (2009). *The teaching gap. Best ideas from the world's teachers for improving education in the classroom*. New York: Free Press.
- Stigler, J. W., Gonzales, P., Kawanaka, T., Knoll, S., et Serrano, A. (1999). *The TIMSS videotape classroom study. Methods and findings from an exploratory research project on eighth-grade mathematics instruction in Germany, Japan, and the United States. A Research and Development Report*. Washington, DC: U.S. Department of Education. Office of Educational Research and Improvement. Repéré à <https://nces.ed.gov/pubs99/1999074.pdf>.
- Strike, K. A., et Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. Dans R. A. Duschl et R. J. Hamilton (Éd.) (p. 147–176). *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice* (pp. 147–176). Albany, NY: SUNY.
- Suarez, M. (1999). Theories, models, and representations. Dans L. Magnani, N. J. Nersessian, et P. Thagard (Éd.), *Model-based reasoning in scientific discovery* (p. 75–99). New York: Kluwer Academic/Plenum Press.
- Tachoua, N. (2005). *Interactions enseignant-élèves et situations d'enseignement-apprentissage en optique géométrique* (Thèse de doctorat, Université Lyon 2, Lyon, France).
- Talbot, L. (2005). *Pratiques d'enseignement et difficultés d'apprentissage*. Ramonville Saint-Ange : Éditions Éres.
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and instruction*, 4(1), 71–87.
- Tiberghien, A. (2000). Designing teaching situations in the secondary school. Dans R. Millar, J. Leach, et J. Osborne (Éd.), *Improving science education: The contribution of research* (p. 27–47). Buckingham, UK: Open University Press.
- Tiberghien, A., et Buty, C. (2007). Studying science teaching practices in relation to learning: Time scales of teaching phenomena. Dans R. Pintò et D. Couso (Éd.), *Contributions from Science Education Research* (p. 59–75). Dordrecht: Springer.
- Tiberghien, A., Le Maréchal, J. F., Cross, D., et Malkoun, L. (2007b). *Analysis of verbal and gesture productions in studies on learning processes in science*. Paper presented at the EARLI conference, Budapest, Hongrie.
- Tiberghien, A., et Malkoun, L. (2007). Différenciation des pratiques d'enseignement et acquisitions des élèves du point de vue du savoir. *Éducation et didactique*, 1(1), 29–54.

- Tiberghien, A., et Malkoun, L. (2010). Analysis of classroom practices from the knowledge point of view: how to characterize them and relate them to students' performances. *Revista brasileira de pesquisa em educação em Ciências*, 10(1), 1–32.
- Tiberghien, A., Malkoun, L., Buty, C., El Sowayssi, N., et Mortimer, E. (2007). Analyse des savoirs en jeu en classe de physique à différentes échelles de temps. Dans G. Sensevy et A. Mercier (Éd.), *Agir ensemble. L'action didactique conjointe du professeur et des élèves* (p. 73–98). Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Tiberghien, A., Malkoun, L., et Seck, M. (2008). Analyse des pratiques de classes de physique : aspects théoriques et méthodologiques. *Les Dossiers des sciences de l'éducation*, 19(1), 61–79.
- Tiberghien, A., Psillos, D., et Koumaras, P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional science*, 22(6), 423–444.
- Tiberghien, A., et Sensevy, G. (2012). Video studies: Time and duration in the teaching-learning processes. Dans J. Dillon et D. Jorde (Éd.), *Handbook « The World of Science Education »* (p. 141-179). Rotterdam/Boston/Taipei: Sense Publishers.
- Tiberghien, A., Veillard, L., Le Maréchal, J.-F., Buty, C., et Millar, R. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries. *Science education*, 85(5), 483–508.
- Tiberghien, A., et Vince, J. (2005). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, 10, 153–176.
- Treagust, D. F., Chittleborough, G., et Mamiala, T. L. (2002). Students' understanding of the role of scientific models in learning science. *International journal of science education*, 24(4), 357–368.
- Trowbridge, D. E., et McDermott, L. C. (1980). Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension. *American journal of physics*, 48(12), 1020–1028.
- Trowbridge, D. E., et McDermott, L. C. (1981). Investigation of student understanding of the concept of acceleration in one dimension. *American journal of physics*, 48, 242–253.
- Tsui, C.-Y., et Treagust, D. F. (2003). Genetics reasoning with multiple external representations. *Research in science education*, 33(1), 111–135.
- Tupin, F. (2003). *De l'efficacité des pratiques enseignantes ?* Toulouse : Presses universitaires du Mirail.
- Tytler, R. (2002). Teaching for understanding in science: student conceptions research, and changing views of learning. *Australian science teachers' journal*, 48(3), 14-16-21.
- Van der Maren, J.-M. (1996). *Méthodes de recherche pour l'éducation*. Montréal : Presses de l'Université de Montréal.
- Van Der Valk, T., Van Driel, J. H., et De Vos, W. (2007). Common characteristics of models in present-day scientific practice. *Research in science education*, 37(4), 469–488.
- Van Driel, J. H. (1998). *Teachers knowledge about the nature of models and modelling in science*. Paper presented at the *Annual Meeting of the National Association for Research in Science Education*, San Diego, USA, April 19-22.
- Van Driel, J. H., et Verloop, N. (1999). Teachers' knowledge of models and modelling in science. *International journal of science education*, 21(11), 1141–1153.
- Van Driel, J. H., et Verloop, N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science education. *International journal of science education*, 24(12), 1255–1272.
- Van Hook, S., Huziak, T., et Nowak, K. (2005). Developing Mental Models about Air Using Inquiry-Based Instruction with Kindergartners. *Journal of elementary science education*, 17(1), 26–38.
- Van Joolingen, W. (2004). Roles of modeling in inquiry learning. Paper presented at the *IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies* (p. 1096–1097), Joensuu, Finland, august 30.
- Veillard, L., Tiberghien, A., et Vince, J. (2011). Analyse d'une activité de conception collaborative de ressources pour l'enseignement de la physique et la formation des professeurs. Le rôle de théories ou outils spécifiques. *Activités*, 8(2), 202-227.
- Verhaeghe, J. C., Wolfs, J. L., Simon X. et Compère, D. (2004). *Pratiquer l'épistémologie. Un manuel pour les maîtres et formateurs*. Bruxelles : De Boeck et Larcier.
- Viennot, L. (1996). *Raisonnement en physique, la part du sens commun*. Bruxelles : De Boeck.

- Vincent, S., Garnier, C., et Marinacci, L. (2006). Les pratiques éducatives en sciences et en technologie : Points de vue d'enseignants et d'enseignantes. *Canadian journal of math, science et technology education*, 6(2), 119–143.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4, 45–69.
- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modelling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 45–69.
- Vygotski, L. (1997). *Pensée et langage* (3<sup>e</sup> éd.). Paris : La Dispute.
- Walliser, B. (1977). *Système et modèles*. Paris : Seuil.
- Wartofsky, M. W. (1966). The model muddle: proposals for an immodest realism. In his models: representation and scientific understanding. Dans M. W. Wartofsky (Éd.), *Models* (p. 1–11). Dordrecht, The Netherlands: Reidel.
- Wartofsky, M. W. (1968). *Conceptual foundations of scientific thought*. London: Collier-Macmillan.
- Wartofsky, M. W. (1979). *Models: representation and the scientific understanding*. Boston: Reidel.
- Weil-Barais, A., et Lemeignan, G. (1990). Apprentissage de concepts en mécanique et modélisation de situations expérimentales. *European journal of psychology of education*, 5(4), 391–415.
- Wells, M. (1987). *Modeling instruction in high school physics* (Doctoral dissertation unpublished. Arizona State University, Phoenix, Arizona, USA).
- Wells, M., Hestenes, D., et Swackhamer, G. (1995). A modeling method for high school physics instruction. *American journal of physics*, 63(7), 606–619.
- Whitaker, R. J. (1983). Aristotle is not dead: Student understanding of trajectory motion. *American journal of physics*, 51(4), 351–357.
- White, B. Y. (1993). ThinkerTools: Causal models, conceptual change, and science education. *Cognition and instruction*, 10(1), 1–100.
- White, B. Y., et Frederiksen, J. R. (1990). Causal model progressions as a foundation for intelligent learning environments. *Artificial intelligence*, 42(1), 99–157.
- White, B. Y., et Frederiksen, J. R. (1998). Inquiry, modeling, and metacognition: Making science accessible to all students. *Cognition and instruction*, 16(1), 3–118.
- Wilensky, U., et Reisman, K. (2006). Thinking like a wolf, a sheep, or a firefly: Learning biology through constructing and testing computational theories—an embodied modeling approach. *Cognition and instruction*, 24(2), 171–209.
- Williams, E. G. (2011). *Fostering high school physics students' construction of explanatory mental models for electricity: Identifying and describing whole-class discussion-based teaching strategies* (Doctoral Dissertation, University of Massachusetts, Amherst, USA).
- Wilson, L. O. (2013). Anderson and Krathwohl - Bloom's taxonomy revised. Understanding the new version of Bloom's taxonomy. Repéré à <http://thesecondprinciple.com/teaching-essentials/beyond-bloom-cognitive-taxonomy-revised/>.
- Windschitl, M., et Thompson, J. (2006). Transcending simple forms of school science investigation: The impact of preservice instruction on teachers' understandings of model-based inquiry. *American educational research journal*, 43(4), 783–835.
- Wu, H.-K., et Wu, C.-L. (2011). Exploring the development of fifth graders' practical epistemologies and explanation skills in inquiry-based learning classrooms. *Research in science education*, 41(3), 319–340.
- Zimmermann, E. (2000). The structure and development of science teachers' pedagogical models: Implications for teacher education. Dans J. Gilbert et C. Boulter (Éd.), *Developing models in science education* (p. 325–341). Dordrecht : Kluwer.